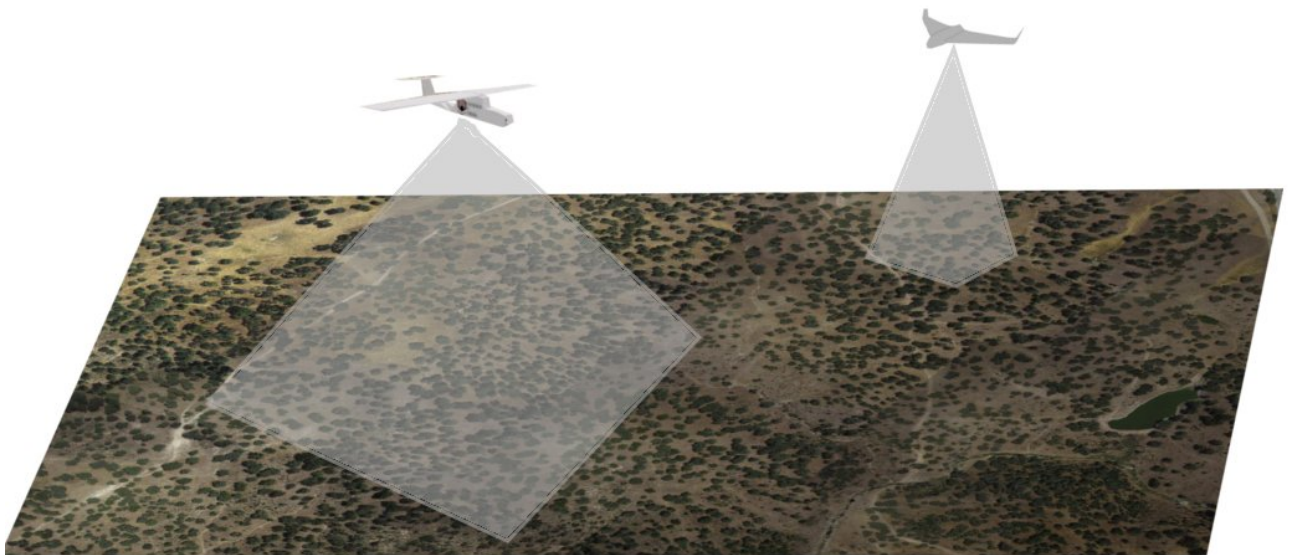


UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Tesis doctoral

Corrección automática de la geometría de fotogramas
capturados desde plataformas aéreas no tripuladas

Sebastián Castillo Carrión
Córdoba, 2014



TITULO: *Corrección automática de la geometría de fotogramas capturados desde plataformas aéreas no tripuladas.*

AUTOR: *Sebastián Castillo Carrión*

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2014
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

TESIS DOCTORAL

Corrección automática de la geometría de fotogramas
capturados desde plataformas aéreas no tripuladas

Autor: Sebastián Castillo Carrión
Director: Dr. José Emilio Guerrero Ginel
Córdoba, Mayo 2014

Dr. JOSE EMILIO GUERRERO GINEL, Catedrático de Universidad del Departamento de Producción Animal de la Universidad de Córdoba.

INFORMA: que la presente tesis doctoral titulada “Corrección automática de la geometría de fotogramas capturados desde plataformas aéreas no tripuladas”, y que constituye la memoria presentada por D. Sebastián Castillo Carrión, ha sido realizada bajo mi dirección durante el periodo 2011-2014 y, a mi parecer, reúne las condiciones académicas exigidas por la legislación vigente para aspirar al grado de Doctor por la Universidad de Córdoba.

y para que quede constancia, firmo el presente informe en Córdoba a 21 de mayo de 2014.

Fdo.: Prof. Dr. José Emilio Guerrero Ginel

TÍTULO DE LA TESIS:

“Corrección automática de la geometría de fotogramas capturados desde plataformas aéreas no tripuladas”

DOCTORANDO: D. Sebastián Castillo Carrión

INFORME RAZONADO DEL DIRECTOR DE LA TESIS

La presente tesis doctoral supone un importante avance en el conocimiento y en su aplicación, relativos a la captura, procesamiento, visualización y utilización de fotogramas, que originalmente no disponen de precisión métrica. La investigación básica y aplicada realizada confluye en la obtención de resultados de indudable relevancia científica y tecnológica.

La investigación realizada, incorpora el desarrollo metodológico para la incorporación de fotogramas con distinta resolución espacial, en mosaicos contruidos con diversas fuentes fotogramétricas y que abarcan amplias áreas del territorio. El tratamiento de imágenes procedentes de UAVs y la optimización de los procedimientos para realizar correcciones geométricas automáticamente, sin apoyo de datos topográficos de campo, constituye un avance digno de mencionar, por lo que supone de aportación al conocimiento, como por la enorme repercusión practica que puede tener para el desarrollo de utilidades asociadas a la generación de imágenes que originalmente no tienen métrica, no solo en el caso de las imágenes tomadas con UAVs, sino también en el caso de otras imágenes, con poca precisión métrica.

También supone una importante aportación a los procedimientos de navegación de UAVs y a su sistematización, que permitirán mejorar sustancialmente la eficiencia del proceso integral de captura, tratamiento y utilización de imágenes fotogramétricas.

La tesis se acompaña de una destacable cantidad de programas informáticos originales y con código abierto, que pueden suponer una gran ayuda a investigadores en el ámbito de la corrección automática de imágenes fotogramétricas.

Los resultados obtenidos en esta tesis doctoral ha dado lugar a una publicación en revista indexada y otro está en proceso de evaluación para su posible publicación. A continuación, se detalla la referencia de dicho artículo:

Castillo-Carrión, S., Romero-Jiménez, R., Guerrero-Ginel, J.-E., and Meroño-Larriva, J.-E. (2012). Algorithms and accuracy of transforming orthophoto maps into quadtree tiling for google maps. Journal of Imaging Science & Technology, 56(1): 0105021-0105028.

Por todo lo anterior, pienso que esta tesis doctoral reúne suficiente requisitos para ser sometida a su defensa pública.

Córdoba, 21 de mayo de 2014

Fdo.: Prof. Dr. José Emilio Guerrero Ginel

Agradecimientos

Quiero mostrar mi agradecimiento a todas aquellas personas que de un modo u otro han hecho posible el desarrollo de esta tesis.

En primer lugar quiero agradecer a D. José Emilio Guerrero Ginel, director de esta tesis, por la magnífica labor de dirección que ha desempeñado, mostrando gran flexibilidad y adaptación en la forma de trabajar, además de ser un extraordinario profesor y “animador”.

A todo el personal del departamento de Producción Animal, por fomentar un buen ambiente de trabajo, demostrando ser unos excelentes compañeros.

A todos aquellos que de alguna forma se han visto involucrados en los vuelos de UAV. Nunca olvidaré la ilusión y el nerviosismo en los días de trabajo de campo; las tardes con José Emilio, Ángel y José Carlos hacían agradable estar 7 horas en mitad de un olivar, especialmente en el mes de Julio, a más de 40°C.

A mi familia, especialmente mis padres, por su cariño, apoyo y confianza, que me motivaban a seguir adelante.

Y por último, y no por ello menos importante, a Reme, por su apoyo incondicional frente a la cantidad de horas que he estado ausente para poder elaborar esta tesis, que también se ha convertido en una experta en UAV.

Índice general

Lista de figuras	V
Lista de tablas	IX
Resumen	1
Summary	3
1. Introducción	5
2. Estado del arte	9
2.1. Integración de ortofotografías procedentes de varios orígenes en un sistema universal	9
2.2. Tratamiento de imágenes procedentes de UAVs y optimización de los procedimientos de generación automática de imágenes con métrica	12
3. Materiales y métodos	21
3.1. Integración de ortofotografías procedentes de varios orígenes en un sistema universal	21
3.1.1. Materiales	21
3.1.2. Principio básico de una estructura <i>Quadtree</i> en Google Maps	23
3.1.3. Precisión geométrica del árbol jerárquico	23
3.2. Tratamiento de imágenes procedentes de UAVs y optimización de los procedimientos de generación automática de imágenes con métrica	25
3.2.1. Software de correlación de imágenes: ImageJ	25
3.2.2. Plataforma aérea, conjunto de imágenes y ubicación geográfica	25
3.2.3. Análisis estadístico aplicado a la optimización de paráme- tros	28

3.3.	Contraste de la optimización de los procedimientos de generación automática de imágenes con métrica	28
3.3.1.	Plataforma aérea, conjunto de imágenes y ubicación geográfica	28
3.3.2.	Parámetros del vuelo	30
3.3.3.	Validación del algoritmo <i>SIFT</i> optimizado	31
3.3.4.	Software libre de creación de ortofotografía: MicMac . . .	31
3.3.5.	Equipamiento Hardware y Herramientas Software . . .	31
3.3.6.	Precisión geométrica de la ortofoto	31
4.	Resultados y discusión	33
4.1.	Integración de ortofotografías procedentes de varios orígenes en un sistema universal	33
4.1.1.	Generación del árbol de teselas	33
4.1.1.1.	Pasos previos. Sistema de proyección y coordenadas	33
4.1.1.2.	Generación de un subárbol	34
4.1.1.3.	Resultado de la generación de los subárboles . . .	45
4.1.1.4.	Resultado de la actualización del subárbol tqssrrrtq	47
4.1.2.	Estudio estadístico de la exactitud posicional	51
4.2.	Tratamiento de imágenes procedentes de UAVs y optimización de los procedimientos de generación automática de imágenes con métrica	56
4.2.1.	Configuración del sensor y métodos de captura	56
4.2.2.	Conexión inalámbrica UAV-GCS	56
4.2.3.	Establecimiento de correspondencias entre el fichero de telemetría y las imágenes aéreas	57
4.2.4.	Extracción de regiones de interés de una ortofoto . . .	58
4.2.5.	Preparación del entorno software	60
4.2.6.	Optimización de parámetros	63
4.2.7.	Estudio estadístico aplicado a la optimización de parámetros	66
4.3.	Contraste de la optimización de los procedimientos de generación automática de imágenes con métrica	69
4.3.1.	Configuración del sensor	69
4.3.2.	Parámetros del vuelo	73
4.3.3.	Ejecución del vuelo	74
4.3.4.	Validación del algoritmo <i>SIFT</i> optimizado	78
4.3.5.	Generación de ortofotografía asignando puntos de control automáticamente	81

4.3.5.1. Identificación de puntos correlativos entre imágenes aéreas y regiones de una ortofoto ya georeferenciada	82
4.3.5.2. Correlación automática de puntos de control entre imágenes aéreas	83
4.3.6. Tests de calidad posicional	85
5. Conclusiones	93
Bibliografía	95
Anexos	109
A. Código desarrollado para integrar ortofotografías en un sistema universal	111
A.1. JA2Google.pl	111
A.2. blank.tif, blank.jpg	112
A.3. Orto.pm	112
A.4. params.pl	113
B. Código desarrollado para control y tratamiento de datos de APM	115
B.1. ard_pos_att.pl	115
B.2. Cambio de formato temporal	115
B.3. Listado de imágenes y marca temporal de adquisición	116
B.4. ard_img.pl	116
B.5. Cam_Movement.pde	116
B.6. script de control automático de cámaras con firmware CHDK .	117
C. Ficheros y código desarrollado en el estudio de la optimización de parámetros del algoritmo SIFT	119
C.1. crear_ortobase.sh + img.txt	119
C.2. siftGCP.ijm + img.txt	119
C.3. Experimento1.pdf-Experimento12.pdf	119
C.4. Experimento13.pdf	121
D. Ficheros y código desarrollado para generación automática de imágenes con métrica	123
D.1. Validación de la optimización en un vuelo programado	123
D.2. Identificación de GCPs	125
D.3. imgcp_imgcp.pl	125
D.4. Rutina auxiliar para el cálculo estadístico	126

D.5. Tests NSSDA de cada ensayo en la finca de Santa Clotilde . .	134
D.6. Ortofoto y modelo digital del terreno del Ensayo1	147
D.7. Herramientas MicMac utilizadas para elaboración de ortofotos	147
D.7.1. Comandos simplificados	147
D.7.2. Flujo de trabajo	152

Índice de figuras

3.1. Localización geográfica de una ortofoto de 15cm de resolución de un área de la provincia de Córdoba	22
3.2. Árbol jerárquico de teselas	23
3.3. Localización del área de adquisición de imágenes obtenidas con cámara GoPro	26
3.4. Ubicación geográfica de la finca Santa Clotilde en Cardena(Córdoba)	30
4.1. Subrama del árbol general de teselas	34
4.2. Diagrama de flujo del algoritmo generador de identificadores de teselas	35
4.3. Diagrama de flujo del algoritmo de generación de teselas hoja	36
4.4. Generación de la tesela hoja “tqssrrrtqstqssqs”	38
4.5. Diagrama de flujo del algoritmo de generación de teselas de niveles superiores	39
4.6. Ejemplo de generación de una tesela tqssrrrtqstqssq a partir de sus teselas hijas	40
4.7. Árbol jerárquico global y subárbol a actualizar. En color azul se muestra el subárbol a actualizar, en verde se muestran las teselas hoja	41
4.8. Diagrama de flujo del algoritmo de actualización del árbol . . .	42
4.9. Diagrama de flujo del algoritmo optimizado generador/actualizador del árbol jerárquico	43
4.10. Recorrido optimizado del árbol, mostrando en qué orden se genera cada tesela.	44
4.11. Cobertura geográfica de nodos origen de varios subárboles en la región de Andalucía	45
4.12. Teselas de la rama con tesela origen “tqssrrrtq” y tesela final “tqssrrrtqstqssqs”	46
4.13. Ortofoto a incorporar en el árbol jerárquico	47

4.14. Teselas tqssrrrtqsrqrqs (izquierda) y tqssrrrtqsrqrtrt (derecha), raíces de los dos subárboles a actualizar	48
4.15. Árbol jerárquico global actualizado a partir de una nueva ortofoto	49
4.16. Teselas tqssrrrtqsrqrqs (izquierda) y tqssrrrtqsrqrtrt (derecha) actualizadas	50
4.17. Exactitud posicional del árbol jerárquico generado. Diagrama de barras y distribución normal de Ex	54
4.18. Exactitud posicional del árbol jerárquico generado. Diagrama de barras y distribución normal de Ey	54
4.19. Exactitud posicional del árbol jerárquico generado. Diagrama de barras y distribución normal de RMSE	55
4.20. Correspondencia entre la telemetría del UAV y las imágenes .	57
4.21. Diagrama de flujo del algoritmo de extracción de regiones de una ortofoto	59
4.22. Tres imágenes aéreas tomadas con una cámara Gopro (parte superior), y sus correspondientes regiones (parte inferior) extraídas de una ortofoto de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.	60
4.23. Diagrama de flujo de una macro implementada en ImageJ para correlacionar múltiples imágenes	62
4.24. SM para diferentes valores de nScales y sigma asignados en el procedimiento de optimización de SIFT.	64
4.25. CMR para diferentes valores de nScales y sigma asignados en el procedimiento de optimización de SIFT.	65
4.26. Correlaciones entre los puntos clave de la imagen aérea GOPR0061 y su región correspondiente en una ortofoto de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.	66
4.27. Algoritmo de adquisición de imágenes para cámara Canon con firmware CHDK.	70
4.28. Diagrama de flujo del algoritmo que estabiliza el dispositivo de adquisición de imágenes	72
4.29. Definición de una ruta de vuelo en Mission Planner	75
4.30. Rutas de la plataforma. Cada toma fotográfica y su orientación se representa con un icono de aeromodelo.	77
4.31. Selección de 24 imágenes aleatorias en la finca de Santa Clotilde. .	79
4.32. SM (izquierda), y CMR (derecha) sobre una muestra aleatoria de 50 correlaciones, aplicando RANSAC con error máximo de alineación=10 píxeles	80
4.33. SM (izquierda) y CMR (derecha) utilizando RANSAC con error máximo de alineación=1.1 píxeles	81

4.34. Extracción automática de puntos de control sobre el terreno .	82
4.35. Correlación automática de puntos de control entre imágenes aéreas	84
4.36. Distribución de puntos de mayor precisión.	87
4.37. Distribución de puntos de control del ensayo 1	89
4.38. Ortofoto generada en el ensayo 1	90
4.39. Modelo digital del terreno generado en el ensayo 1	91

Índice de tablas

3.1. Especificaciones técnicas de la plataforma Skywalker FPV . . .	25
3.2. Especificaciones técnicas del conjunto de imágenes, criterios, y cámara GoPro	27
3.3. Especificaciones técnicas de una ortofoto de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio	28
3.4. Especificaciones técnicas de un modelo digital del terreno de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Coordenadas en UTM 30N ETRS 1989	29
3.5. Especificaciones técnicas del modelo digital del terreno del IGN. Coordenadas en UTM 30N ETRS 1989	29
3.6. Especificaciones técnicas de la plataforma Skywalker X8 . . .	29
3.7. Especificaciones técnicas de una cámara Canon IXUS 220HS .	30
4.1. Variables estadísticas para el estudio de la exactitud posicional del árbol jerárquico generado.	51
4.2. Variables estadísticas complementarias expresadas en metros .	51
4.3. Ex(m) para cada intervalo	52
4.4. Ey(m) para cada intervalo	53
4.5. Et(m) para cada intervalo	53
4.6. Media y desviación estándar	53
4.7. Especificaciones de cada región extraída de una ortofoto de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio . .	59
4.8. SM (normal) y CMR (cursiva) para diferentes valores de FDS y NNDR en el proceso de optimización de SIFT	63
4.9. Análisis de varianza de la variable dependiente CMR frente a los factores sigma y nScales en el procedimiento de optimización de SIFT	67
4.10. Test de medias de la variable dependiente CMR respecto a sigma y nScales en el procedimiento de optimización de SIFT. Intervalo de confianza al 95 %	67
4.11. Media y desviación estándar del conjunto de validación	68

4.12. Especificaciones técnicas de las regiones extraídas de la orto- foto especificada en la tabla 3.3	80
4.13. Media y desviación típica de CMR frente a diferentes errores de alineación	81
4.14. Puntos de control detectados automáticamente.	85
4.15. Tests NSSDA en varios ensayos	87
4.16. Especificaciones técnicas de la ortofoto generada en el ensayo 1	92
4.17. Especificaciones técnicas del modelo digital del terreno gene- rado en el ensayo 1	92
C.1. Resumen de los resultados mostrados en Experimento1.pdf- Experimento10.pdf	120
C.2. Resumen de los resultados mostrados en Experimento13.pdf .	122
D.1. Optimización del filtrado RANSAC. Valores de SM y CMR asignando diferentes errores de alineación	124
D.2. Puntos de control detectados en cada imagen para cada ensayo	126
D.3. Test NSSDA. Ensayo1, MDT05m	135
D.4. Test NSSDA. Ensayo1, MDT10m	137
D.5. Test NSSDA. Ensayo2, MDT05m	139
D.6. Test NSSDA. Ensayo2, MDT10m	141
D.7. Test NSSDA. Ensayo3, MDT05m	143
D.8. Test NSSDA. Ensayo3, MDT10m	145

Resumen

El documento consta de cuatro capítulos, en el primero se define el marco en el que se desarrolla el trabajo de investigación, y los objetivos a alcanzar. El segundo capítulo presenta el estado del arte sobre la generación de información geoespacial, y su gestión y actualización. El tercer capítulo muestra los materiales y métodos utilizados: plataformas de vuelo, sensores, software, zonas de vuelo, etc. En el cuarto capítulo se presentan los resultados que resumimos a continuación:

Con el objetivo de integrar y gestionar ortofotografías con diferentes características y procedentes de varios orígenes, se ha desarrollado una sistemática sustentada en árboles jerárquicos, que permite gestionar las importantes cantidades de información espacial disponible y acceder a ella de forma sencilla y ágil. La investigación ha incluido, en un territorio de 89.000 Km^2 , los procedimientos para generar el árbol de teselas, los subárboles y un estudio de exactitud posicional.

Se han generado distintas soluciones para incrementar el potencial de plataformas de vuelo tripuladas remotamente, dotadas con sensores a bordo, de ellas se destacan:

- Integración de los sensores con la plataforma de vuelo, mediante protocolos de procesamiento de la información, con soluciones basadas en hardware y software libre, destacando entre ellos el autopiloto Ardupilot Mega y el protocolo de comunicación inalámbrica MAVLINK.
- Procesamiento automático de la información suministrada por la plataforma y los sensores, utilizando software especializado de procesamiento de imágenes y software fotogramétrico, y estableciendo flujos de trabajo entre ambos. Se ha empleado software de código abierto para favorecer la interoperatividad y compatibilidad entre las distintas herramientas; entre las herramientas utilizadas destacan ImageJ y MicMac, así como la posibilidad de adaptar el software a la naturaleza de las imágenes a procesar, lo cual nos ha permitido llevar a cabo una optimización de dicho software.

- El proceso de optimización de los diferentes parámetros para mejorar la geometría, para el que se han utilizado las imágenes capturadas con dos cámaras diferentes y dos plataformas de vuelo.
- El procedimiento para generar una ortofoto, analizando su funcionalidad y la calidad del resultado final.

El documento se completa con las conclusiones del trabajo y con los Anexos en los que se han recogido las líneas de código correspondientes a los distintos programas desarrollados para la captura, gestión, optimización de la geometría de las imágenes capturadas y visualización de las ortofotos.

Summary

This document consists of four chapters, the first one contains the framework in which the present PhD thesis is developed, and describes the objectives achieved in this thesis. The second chapter provides a literature review of creation, management and update of geospatial information. The third chapter describes materials and methods used: aerial platforms, sensors, software, flight areas, etc. The fourth chapter provides the results, which here we describe a general view of them:

It has been developed a method based in hierarchical trees to integrate and manage orthophotos from different sources and with different characteristics, which allows a more efficient access to geospatial information. This research includes procedures on generating tree tiles and evaluates its positional accuracy in an area of 89.000 Km^2 .

It has been developed different methodologies to explore the potential for using unmanned aerial vehicle with sensors:

- Sensors integration with aerial platform developing new protocols of information processing, based in open source software and hardware, like Ardupilot Mega, an open source unmanned aerial vehicle, and MAVLINK, a protocol for communicating with small unmanned vehicle.
- Automated processing of information relating to logs generated by sensor and aerial platform, using image processing software and photogrammetry tools workflows. It has been used open source software, which encourages software compatibility and interoperability; we have used MicMac and ImageJ, and, as they are open-source programs, we have made optimization of their parameters, accomodating software to image content.
- Two cameras and two aerial platforms have been used to optimize parameters of the software involved.
- It has been designed and developed a workflow to make an orthophoto, and it has been evaluated its accuracy and usefulness.

Finally, this document ends with conclusions and annexes, which collect source code developed for tasks of capturing, management and geometry optimization of images, and visualization of orthophotos.

Capítulo 1

Introducción

Según el Instituto Geográfico Nacional ¹ (IGN), se conoce por información geográfica o espacial a todo dato vinculado a una posición sobre el terreno. Debido a la complejidad que presenta la información geográfica (cantidad de elementos que la componen, propiedades dimensionales, etc), explotar todo su potencial presenta cierta complejidad, por lo que es necesario almacenarlas de forma estructurada en bases de datos geográficas, llevando a cabo operaciones de consulta y modificación a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Un SIG es una tecnología que permite analizar y gestionar la información espacial con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión (Llopis 2006). Más informalmente, se puede definir un SIG como un entorno de trabajo automatizado en el que se dispone toda la información contenida en un conjunto de mapas necesarios para un determinado estudio, información que se puede combinar y relacionar, estando cada elemento espacial identificado individualmente con todas sus características (Nuñez-Alonso 1989).

Los SIGs cada vez gestionan más información debido a la demanda que se experimenta en ámbitos educativos, gestión del territorio, medio ambiente, urbanismo, registro de la propiedad, etc, a lo que se suma el aumento del volumen de datos espaciales aportados por diversas fuentes (telepercepción, censos, etc), variedad de formatos, diversas escalas, etc. En torno a esta área existe un amplio y activo campo de investigación, desarrollando e implantando nuevos métodos para tratamiento, organización y compresión de imágenes (Meaden and Kapetsky 1992); plataformas universales como

¹<http://www.ign.es/ign/resources/cartografiaEnsenanza/ideeEso/I-IDE/I-IDE/recursos/I-IDE.pdf>, accedido 6 Febrero 2014

Google Maps ², Yahoo maps ³ y Bing Maps ⁴ organizan y estructuran la información en mosaicos empleando metodologías que agilizan el acceso.

Otra importante evolución ha tenido lugar en las técnicas empleadas para generar información geográfica a través de fotogrametría aérea: la introducción de vehículos aéreos no tripulados (UAVs), las tecnologías de mapeado y el uso de cámaras fotográficas digitales, se emplean hoy día como herramientas complementarias a sistemas convencionales como aviones tripulados y teledetección en la adquisición de información a pequeña o gran escala de un objeto o fenómeno. Un UAV puede ser controlado de forma remota, o de forma autónoma por un dispositivo integrado en el UAV (Jenaro-de Mencos 2013, Eisenbeiss 2004), cuyos parámetros se pueden monitorizar y modificar desde una estación de control (GCS) a través de un enlace inalámbrico; en los últimos años, los módulos xbee se presentan como una opción económica y eficiente, ampliamente utilizada en redes de sensores basados en el protocolo 802.15.4 Zigbee (Mayalarp et al. 2010); un UAV que incorpore un módulo xbee puede comunicarse con otros sistemas que integren estos módulos: GCS, otras redes de sensores, etc (Todd et al. 2007), con enlaces inalámbricos teóricos de 40km utilizando antenas dipolo y visión directa⁵.

Los UAV tienen un amplio abanico de aplicaciones, como elaboración de modelos digitales, gestión del territorio, planificación urbana, evaluación de catástrofes, agricultura de precisión, inspección del terreno, etc; según autores como Jenaro-de Mencos and Piñeiro-García-de León (2014), los UAV, y en especial una variante conocida como NAV (nano UAV), con un peso tan reducido que no daña a una persona en caso de impacto, ni requiere contemplar medidas específicas de coordinación del espacio aérea, en la próxima década estarán cada vez más presentes en entornos urbanos.

Los datos recopilados por el UAV presentan ciertas características que exigen un tratamiento previo a la generación del producto final como pueden ser una ortofoto de precisión, un DTM, DSM, etc. Lograr efectuar este procesamiento de forma eficaz y automática es un proceso clave en el uso de UAVs para teledetección.

Las nuevas tecnologías permiten abaratar costes en sensores de captación de imágenes, popularizando el uso de cámaras no profesionales para usos métricos; sin embargo estas imágenes no poseen métrica adecuada para fines precisos y presentan deformaciones geométricas, siendo necesario algoritmos de corrección. No obstante, en los últimos años, la visión computacional ha

²maps.google.es, accedido 7 Febrero 2014

³<http://espanol.maps.yahoo.com/>, accedido 7 Febrero 2014

⁴<http://www.bing.com/maps/>, accedido 7 Febrero 2014

⁵<http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/point-multipoint-rfmodules/xbee-pro-868#specs>, accedido 4 Marzo 2014

trabajado activamente en el procesamiento de este tipo de imágenes para aplicar en múltiples ámbitos, desarrollando algoritmos que permiten detectar características distintivas en imágenes (correlación de imágenes); un alto porcentaje de estos algoritmos están enfocados al mercado reciente, cada vez más amplio, de dispositivos móviles que integran sensores genéricos, dotando a estos dispositivos de valor añadido y proporcionando un enorme potencial. Uno de los ámbitos de aplicación es el reconocimiento de patrones, incluso en condiciones poco favorables: iluminación deficiente, imágenes borrosas, cambios en la escena, etc, permitiendo relacionar imágenes entre sí de forma eficiente. Estos algoritmos permiten que un dispositivo móvil detecte ciertos elementos en imágenes y efectúe diversas operaciones (rastrear objetos en movimiento, fusionar imágenes, etc).

Las imágenes obtenidas en condiciones no favorables, como es el caso de las recogidas desde UAV normalmente con cámaras no profesionales, una vez tratadas con técnicas de visión por computador pueden alcanzar niveles de precisión y calidad suficientes para desarrollar numerosas utilidades. Un aspecto importante a resaltar es que combinando visión por computador y fotogrametría, se pueden generar modelos tridimensionales e imágenes con métrica de forma automática a partir de imágenes, simplificando procesos manuales (Bejarano et al. 2013). Es por ello que se plantea una tesis con los siguientes objetivos:

Objetivos

El objetivo general de esta tesis es diseñar e implementar una sistemática de generación de ortofotos y procesamiento de imágenes, de forma automatizada a partir de vuelos UAV realizados con cámaras sin métrica precisa, organizando, estructurando e integrando el resultado en un mosaico compatible con plataformas universales.

Los objetivos específicos son:

- Diseñar e implementar un algoritmo que organice y estructure ortofotos en mosaicos fáciles de usar, sin consumo de grandes recursos y compatibles con plataforma universales.
- Diseñar e implementar una sistemática para la captura y tratamiento de imágenes procedentes de plataformas UAVs.
- Optimizar los procedimientos para la generación automática de imágenes con métrica partiendo de imágenes sin métrica.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Integración de ortofotografías procedentes de varios orígenes en un sistema universal

El rápido crecimiento de hardware y software, unido a los requerimientos de información geográfica por parte de la comunidad de usuarios, ha aumentado el uso de sistemas SIG para analizar, procesar y gestionar información geoespacial. El hecho de que Internet se encuentra cada vez más presente en todos los ámbitos, facilitando el intercambio de información, ha ocasionado una evolución natural de los SIG hacia las llamadas Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) (Rodríguez-Pascual et al. 2007).

Un IDE permite visualizar, superponer, consultar y analizar la información geográfica publicada en Internet, siguiendo unos estándares establecidos por la Directiva *Inspire* (EU 2007) y el *Open Geospatial Consortium* (OGC); la información está compartida en la red, y el usuario accede mediante uno de los Sistemas de Información que constituye el IDE, el cual transmite la información geográfica siguiendo el estándar WMS del OGC a través de un servicio de mapas (Pascual et al. 2006). La idoneidad del formato de los datos, medios de transmisión, y cantidad de información que se ha de transmitir desempeña un papel fundamental en la percepción de latencia o retraso que tiene el usuario del sistema, siendo el caso de imágenes ráster el elemento más representativo. Existen numerosos ejemplos de Sistemas de Información, como son el Sistema de Información Geográfica de Identificación de Parcelas Agrícolas (SIGPAC) (Mirón-Pérez 2005), orientado a la gestión de ayudas agrarias; GEOPISTA ¹, Sistema de Información territorial de código

¹<http://www.geopista.com/>, accedido 30 Noviembre 2013

abierto para los Ayuntamientos que permite georreferenciar tanto la información como la propia gestión municipal; IDEAndalucía ², geoportal de la Infraestructura de Datos Espaciales de Andalucía para consultar información geográfica de la Comunidad Autónoma; IDEE ³, Infraestructura de Datos Espaciales de España; etc. Elementos de gran importancia que constituyen un IDE son las ortofotos, cuyo número puede llegar a ser muy elevado, por lo que para realizar un uso y gestión eficaz de éstas es necesario estructurarlas y organizarlas; el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) establece unas directivas para este fin, dividiendo las hojas cartográficas hasta escala 1:5000, aunque en diversas situaciones la división de las hojas puede llegar a producirse hasta escala 1:500; Cuadrado et al. (2006) exponen la dificultad de lograr continuidad geométrica y homogeneidad entre las series cartográficas y dentro de ellas, analizando diferentes soluciones al problema, pero sin llegar a ninguna definitiva.

El avance tecnológico y progresivo abaratamiento de sensores contribuye a que la información geoespacial generada sea cada vez mayor, llegando a la cantidad de varios terabytes al día (Li and Bretschneider 2007). Para agilizar la transmisión de datos, una opción es emplear las nuevas técnicas desarrolladas en transmisión de imágenes. Srinivas et al. (1999) proponen transmisión progresiva de imágenes ráster, comprimiendo y transmitiéndolas gradualmente. Una vez las imágenes comprimidas han llegado al cliente, se reconstruyen.

No obstante, estas técnicas no son suficientes por el volumen de datos espaciales que deben gestionar los servidores, por lo que es necesario recurrir a otras técnicas. Cuando se lleva a cabo una consulta a un servidor de mapas, éste determina cuál es el área de interés a transmitir. Para acelerar el proceso y no procesar el mapa ráster completo, los servidores de mapas implementan un mecanismo denominado “teselado”: el mapa se divide en regiones más pequeñas denominadas teselas, siendo cada una de éstas la unidad mínima de transmisión; se pueden definir varios niveles de detalle y establecer jerarquías, constituyendo una estructura piramidal de teselas que es almacenada en una “caché” con espacio limitado. Cuando el cliente efectúa consultas espaciales al servidor, éste determina qué teselas constituyen la región de interés y, en caso de que no estén en “caché”, procede a la generación piramidal de teselas y su transmisión bajo demanda hacia el cliente.

Kang et al. (2001) proponen uso de “caché” en los clientes para acelerar el acceso a las teselas, y anticiparse a la petición de nuevas teselas generando aquellas con mayor probabilidad de ser accedidas en función del patrón de

²www.ideandalucia.es, accedido 30 Noviembre 2013

³www.idee.es, accedido 07 Abril 2014

acceso de los usuarios, operación denominada *precacheo*. Por otro lado, crear las teselas en la caché del servidor presenta el inconveniente de que puede llegar a crecer exponencialmente al incorporar sucesivamente nuevos niveles de detalle, por lo que no siempre es posible crear una pirámide de teselas de un mapa completo; Quinn and Gahegan (2010) proponen un modelo predictivo de las áreas más accedidas de un mapa, precacheando en el servidor pirámide de teselas de áreas concretas de un mapa.

Las plataformas universales tienen como objetivo hacer llegar la información geográfica a colectivos heterogéneos no especializados, ofreciendo interfaces sencillos y polivalentes (Batty et al. 2010). El ejemplo más claro y conocido es GoogleMaps⁴, geoportal que tuvo sus comienzos en el año 2005, cuyo objetivo era organizar la información mundial y hacerla accesible al usuario (Metternicht 2006); para permitir a los usuarios desarrollar geoportales a medida, Google publicó una interfaz de programación de aplicaciones (API) en Junio de 2005 dando la oportunidad a los usuarios de integrar mapas de Google en aplicaciones propias, desarrollando tecnologías orientadas al usuario altamente interactivas, favoreciendo su integración en la Web 2.0. Otros ejemplos populares de geoportales universales son Bing Maps⁵, Yahoo Maps⁶, OpenStreetMap⁷.

Estos geoportales estructuran la información geoespacial de forma diferente a las plataformas tradicionales, ya que la metodología anterior de cacheado no es escalable al volumen de usuarios que soportan los geoportales universales. Implementan una técnica similar al teselado, denominada *quadtree*, estructura en árbol en la que cada nodo tiene 4 hijos (Samet 1984), siguiendo los mapas una división espacial recursiva, muy útil para visualizar mapas en aplicaciones de tiempo real, por ejemplo servicios web online de mapas (Bereuter and Weibel 2012). Los nodos representan un mapa con un determinado nivel de detalle; este mapa se divide en cuatro áreas, y cada uno de sus cuatro hijos representa una de estas cuatro áreas, pero con mayor nivel de detalle que el nodo padre. De esta forma, a medida que se exploran los niveles más profundos del árbol, los nodos se corresponden con áreas de menor extensión geográfica y mayor resolución de píxel. Cada nodo del árbol recibe el nombre de tesela, y el camino seguido desde la tesela origen o principal del árbol, hasta una tesela en particular, define una nomenclatura de teselado. Los geoportales implementan la jerarquía de forma similar, siendo la principal diferencia la nomenclatura de teselado, que se puede consultar

⁴<https://maps.google.es/>, accedido 3 Diciembre 2013

⁵<http://www.bing.com/maps/>, accedido 3 Diciembre 2013

⁶<http://maps.yahoo.com/>, accedido 3 Diciembre 2013

⁷<http://www.openstreetmap.org>, accedido 3 Diciembre 2013

en Google Maps API documentation⁸, OSGEO Tile Map Service(TMS) Specification⁹, Virtual Earth Tile System de Microsoft¹⁰. El OGC adopta esta técnica a través del estándar *Web Map Tile Service*(WMTS), mejorando el rendimiento y escalabilidad de los servicios web de mapas al simplificarse el procedimiento, ya que recibe directamente peticiones de teselas. La optimización de la sistemática de generación del árbol es un aspecto crucial, particularmente importante cuando se pretende incorporar imágenes de distinta resolución espacial, procedentes de diversas fuentes, distinta resolución temporal, etc; variar el orden de generación y recorrido del árbol produce idénticos resultados, pero difiere en gran medida en la eficiencia lograda.

2.2. Tratamiento de imágenes procedentes de UAVs y optimización de los procedimientos de generación automática de imágenes con métrica

La técnica de correlación de imágenes se emplea para identificar píxeles comunes en un conjunto de imágenes, píxeles que pasan a denominarse puntos de interés. En fotogrametría, los puntos de interés se han venido utilizando principalmente para aplicaciones de orientación de imágenes o reconstrucción 3D. La eficacia de un detector se establece en función de la precisión con que identifica el punto, su estabilidad frente a transformaciones geométricas, e invarianza frente a cambios de iluminación y contraste (Remondino 2006).

Se han desarrollado algoritmos de correlación que emplean imágenes capturadas a partir de cámaras sin métrica precisa. Basan su funcionamiento en la detección de puntos de interés, e identifica una región elíptica e invariante alrededor de cada punto que se define como región de interés. Las regiones detectadas son invariantes a transformaciones geométricas, iluminación, contraste, escalado, etc, y han demostrado ser herramientas muy útiles para generar modelos tridimensionales, detectar patrones, detectar objetos, crear panoramas, etc. (Sima and Buckley 2013). Una aplicación muy popular y extendida es la creación automática de panoramas (Brown and Lowe 2003), tarea que antes requería ir introduciendo de forma interactiva y ordenada las imágenes, y ajustar manualmente la unión entre imágenes; sin embargo,

⁸https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/v2/overlays?hl=es-ES&csw=1#Google_Maps_Coordinates, accedido 7 Diciembre 2013

⁹http://wiki.osgeo.org/wiki/Tile_Map_Service_Specification, accedido 7 Diciembre 2013

¹⁰<http://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb259689.aspx>, accedido 7 Diciembre 2013

los algoritmos desarrollados permiten realizar todo el proceso de forma automática y sin necesidad de grandes recursos, actualmente un gran número de cámaras fotográficas digitales generan panoramas de forma autónoma. Más ejemplos de aplicación de estos algoritmos los encontramos en un algoritmo desarrollado por Achantay et al. (2009) para identificar automáticamente objetos que visualmente resaltan sobre el resto de la imagen. Otra área o disciplina que se está viendo revolucionada es la biométrica, cuyo ámbito de aplicación más popular es la videovigilancia y los sistemas de identificación, entre otros (Kisku et al. 2007); Bicego et al. (2006) investigan el potencial de estos detectores para reconocimiento de caras, Alonso-Fernandez et al. (2009) llevan a cabo ensayos en los que estos algoritmos se emplean en el reconocimiento de iris, Rattani et al. (2007) los aplican para reconocimiento facial y huellas dactilares, y Arbab-Zavar et al. (2007) en el reconocimiento de oídos.

La incorporación de cámaras en dispositivos móviles, unido a la mayor potencia de cálculo de éstos y su uso cada vez más generalizado, ha convertido estos dispositivos en un importante ámbito de aplicación, en el que el uso de algoritmos de visión por computador proporciona un gran valor añadido. Henze et al. (2009) destacan la importancia de los dispositivos móviles como medio de interacción con objetos para obtener información detallada; esta interacción requeriría el uso de algunas marcas visuales (códigos QR, código de barra bidimensionales) o de radiofrecuencia (RFID, etc), sin embargo, el uso de regiones de interés posibilita la interacción natural con los objetos, sin necesidad de marcas visuales adicionales, ya que el algoritmo detecta características inherentes a la propia imagen (Chen et al. 2011), y realiza una búsqueda en una base de datos remota (Girod et al. 2011); el dispositivo móvil envía la imagen a un sistema que extrae las regiones y realiza la búsqueda, o extrae las regiones y las envía al sistema para efectuar la búsqueda, la elección de un método u otro viene determinado por el tipo de conexión que posee el dispositivo. Otros autores llevan a cabo seguimiento de objetos en tiempo real, implementando una versión simplificada de los algoritmos debido a la limitación de potencia de cálculo de estos dispositivos, imponiendo ciertas restricciones al sistema (Wagner et al. 2008), y filtrando correlaciones incorrectas mediante RANSAC (*Random Sample Consensus*) (Fischler and Bolles 1981). RANSAC es un algoritmo iterativo no determinista para estimar los parámetros del modelo matemático que establece homografías entre dos conjuntos de datos; la probabilidad de éxito en su ejecución depende en gran medida del número de iteraciones, obteniendo como resultado un conjunto de *inliers* o datos que se ajustan al modelo, y *outliers* o datos que no se ajustan al modelo.

Otra aplicación de estos algoritmos es la generación de modelos tridimen-

sionales. Una tarea necesaria en toda operación de reconstrucción 3D es la calibración del dispositivo de captura de imágenes. Con los algoritmos actuales de visión por computador, el proceso se simplifica a través de procedimientos de auto calibración, que dependen únicamente de las regiones detectadas entre imágenes, logrando mayor flexibilidad y un entorno de trabajo menos restrictivo (Geng et al. 2013). Kittenberger et al. (2014) muestran un sistema MAV (*micro air vehicle*) con una micro cámara de 23 gramos, sin necesidad de disponer de una cámara fija y calibrada en el área de vuelo; Papachristou and Delopoulos (2014) desarrollan un algoritmo capaz de evaluar la calidad geométrica de los puntos correlacionados en un escenario del que se posee un modelo de calibración débil.

En fotogrametría, el desarrollo de nuevas tecnologías, como el caso de los UAVs, hace que el procedimiento de adquisición de imágenes sea diferente y no se haga bajo las condiciones habituales, sino expuestas a mayores deformaciones geométricas y texturizado deficiente, por lo que es necesario incorporar nuevas metodologías; Lingua et al. (2009b) exponen que se pueden aplicar técnicas de visión por computador, concretamente detectores de regiones de interés, logrando resultados más eficaces.

Actualmente existen múltiples detectores de regiones de interés. Bay et al. (2006) presentan un detector y descriptor de puntos invariante a cambios de escala y rotación, denominado *Speed Up Robust Features*(SURF), mejorando la velocidad respecto a otros detectores, muy útil para aplicaciones en tiempo real, pero no es eficaz cuando las imágenes se ven sometidas a rotaciones considerables (Lingua et al. 2009a). Lowe (2004) propone *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT), algoritmo que, a través de cuatro fases, detecta puntos robustos e invariantes a rotaciones y cambios de escala, iluminación, puntos de vista, y desenfoque de la imagen. Una variante de SIFT es PCA-SIFT (Ke and Sukthankar 2004), que empleando una representación simplificada de regiones de interés logra un algoritmo más rápido y con menor consumo de recursos, pero sensible a operaciones de escalado y desenfoque (Lingua et al. 2009a). SIFT es más lento y no siempre responde bien ante fuertes cambios de iluminación, pero no se ve afectado por rotaciones, cambios de escala, transformaciones afines, y es robusto ante condiciones geométricas y radiométricas adversas (Wessel et al. 2007). Es un detector muy versátil para todo tipo de aplicaciones.

Lingua et al. (2009a) aplican SIFT junto con otros algoritmos fotogramétricos tradicionales, obteniendo resultados comparables a los obtenidos con la técnica fotogramétrica tradicional LSM (Least Squared Matching). Cuando existen grandes distorsiones no es posible aplicar técnicas fotogramétricas tradicionales en este escenario, ofreciendo SIFT mejores resultados.

En fotogrametría, SIFT se ha empleado mayormente para registrar imágenes (De Matías et al. 2009). Obtener la orientación de las imágenes es un requisito obligado en todas aquellas tareas que implican algún tipo de cómputo 3D, como generar el modelo digital del terreno (DTM). La orientación de las imágenes puede venir dada en diversos modelos de orientación; en un proyecto que requiere un resultado en coordenadas geodésicas se genera en primer lugar los modelos de orientación interior y relativo, para transformar posteriormente el modelo de orientación relativo en absoluto (Horn 1987).

Una vez se obtiene el modelo de orientación absoluto, se debe incorporar un informe de calidad del resultado. El Comité Federal de Datos Geográficos (FGDC) establece y desarrolla estándares que definen procedimientos de generación de datos, transferencia, y requisitos de calidad (Federal Geographic Data Committee 1998a). El FDGC define el Estándar Nacional para la Precisión de Datos Espaciales (NSSDA) (Federal Geographic Data Committee 1998c), método estadístico con el que se estima la exactitud posicional de ciertos puntos, tanto en mapas como en estructuras geoespaciales, tomando como referencia puntos georeferenciados con mayor precisión (Federal Geographic Data Committee 1998b).

Obtener el modelo de orientación absoluto es una operación compleja, clasificándose los métodos existentes en lineales y no lineales. Los métodos lineales son más eficientes computacionalmente, pero menos precisos y robustos; los métodos no lineales son más precisos y robustos, pero presentan un mayor costo computacional, y parten de una estimación inicial del resultado. Una aproximación para resolver el problema es definir un modelo no lineal de mínimos cuadrados, obtener una estimación inicial de la orientación absoluta a través de técnicas lineales, transformar el sistema no lineal en lineal y resolver iterativamente. La adecuación de la estimación inicial es crítica para lograr una convergencia correcta y eficiente, dando lugar a propuestas para obtener analíticamente la orientación absoluta inicial; estas técnicas se conocen en fotogrametría bajo la denominación DLT (transformación directa lineal) (Abdel-Aziz and Karara 1971). DLT emplea correspondencias entre píxeles de la imagen y coordenadas geodésicas del terreno para obtener la matriz de transformación.

Los métodos DLT emplean correspondencia entre 3 puntos (Fischler and Bolles 1981), 4 puntos (Hung et al. 1985), 6 ó más puntos (Sutherland 1974). Son métodos efectivos y fáciles de implementar, aunque no son robustos y son altamente susceptibles a posibles variaciones en coordenadas 2D de puntos de la imagen, más aún si se emplean escasos puntos (Wan and Xu 1996). Haralick et al. (1989) señalan que usando métodos de mínimos cuadrados el error disminuye aportando más puntos de control, pero es un proceso complejo, costoso, requiere una gran inversión de tiempo, además de la dificultad

de asignar coordenadas 3D a píxeles de la imagen con la precisión y exactitud adecuadas; Haralick et al. (1994) han realizado ensayos con algoritmos DLT basados en 3 puntos, llegando a la conclusión de que el orden en el que se efectúan las operaciones, o una inadecuada distribución de puntos de control sobre el terreno, afecta al resultado final, aspecto de enorme importancia y aún no resuelto, por lo que es necesario desarrollar nuevas metodologías que permitan obtener un número adecuado de puntos distribuidos homogéneamente por todo el terreno.

Otros autores proponen métodos en los que las correspondencias no se establecen entre puntos, sino entre figuras, argumentando que se cometen menos errores, logrando algoritmos más robustos y precisos. Drewniok and Rohr (1997) presentan un algoritmo basado en la localización de determinados objetos conocidos para orientar de forma automática imágenes aéreas. Ethrog (1984) emplea líneas paralelas y perpendiculares presentes en objetos de la imagen. Ji et al. (2000) establece correspondencia entre puntos, líneas, elipses y círculos. No obstante, no siempre es posible localizar figuras geométricas distribuidas de forma homogénea.

Según Haralick et al. (1989), la precisión de los métodos que establecen correspondencias entre puntos se puede mejorar aumentando el número de puntos y la precisión de las coordenadas 2D y 3D; para simplificar el coste y complejidad del proceso se establece como objetivo clave su optimización y automatización. Morgado and Dowman (1997) proponen un algoritmo que detecta puntos correlativos entre imágenes aéreas y un mapa georeferenciado de escala similar, aunque algunos de los puntos de control no se correlacionan correctamente debido a la altura del terreno, y tampoco presentan una distribución homogénea; Heipke (1997) estudió una posible automatización del proceso, llegando a la conclusión de que no era posible lograr un procedimiento general válido para cualquier situación, ya que su eficiencia viene determinada por características inherentes de la propia imagen y la existencia de objetos identificables, requisito que suelen cumplir las imágenes aéreas de un núcleo urbano, pero de difícil cumplimiento en otras situaciones, como por ejemplo parcelas agrarias. Zhao et al. (2008) proponen una metodología que permite generar ortofotos a través de un UAV sin necesidad de puntos de control; cada vez que el sistema captura una imagen, obtiene la información de posición y orientación de los sensores del UAV, y la encapsula junto a la imagen capturada, pero podemos decir que, aunque la precisión de los sensores de posición y orientación es adecuada para localizar y orientar al UAV, no es suficiente para generar una ortofoto, siendo necesario corregir el error de los sensores; para ello, partiendo de las coordenadas geodésicas asignadas a una imagen, es posible obtener las coordenadas geodésicas de cada píxel de la imagen, contrastándolas con las coordenadas obtenidas a través de una

fuelle de mayor precisión; tras corregir los errores de los sensores, el autor llega a la conclusión de que el error de localización y orientación se debe principalmente a la posición de los sensores en el UAV, y permanece constante a lo largo de todas las imágenes, por lo que sólo es necesario calcular el error en una de las imágenes, y aplicar la misma corrección al resto. Sin embargo, aunque este método permite obtener ortofotos en un período corto de tiempo, el error que subyace después de aplicar la corrección es de varios metros; los autores no concretan si el estudio es válido para cualquier UAV y otros sensores de posición y orientación.

Wessel et al. (2007) desarrollan un algoritmo cuyo objetivo es generar, en tiempo real, ortofotos georeferenciadas a partir de imágenes SAR (Radar de Apertura Sintética) tomadas desde satélite. Una vez se han obtenido las imágenes, para generar la orientación absoluta de éstas se necesita disponer, entre otras cosas, de la trayectoria seguida por el satélite. Definiendo puntos de control en las imágenes, se puede calcular la trayectoria seguida por el satélite; identificar y posicionar estos puntos manualmente en las imágenes SAR es una tarea compleja. A través de SIFT, Wessel et al. (2007) correlacionan las imágenes recientes con otras georeferenciadas existentes, utilizando los puntos detectados en la imagen georeferenciada como puntos de control, y a través de la coordenada Z de un modelo digital del terreno existente (DEM) se obtiene la tercera coordenada del punto sobre el terreno. A través de varios tests, comprueban que el algoritmo funciona correctamente utilizando imágenes de diferentes zonas urbanas, escenas capturadas con diferentes ángulos de incidencia, distintas órbitas y sensores, etc; no obstante, la eficacia de SIFT presenta una fuerte dependencia del contenido de la imagen y de una textura adecuada, afectando a la cantidad y precisión de puntos de control detectados, prueba de ello son los resultados obtenidos por Chureesamphant and Susaki (2014), que desarrollan un algoritmo que extrae de forma automática puntos de control de imágenes SAR polarimétricas obtenidas de diferentes satélites y distintos puntos de vista, aplicando SIFT junto con una minimización del error cuadrático medio sobre una imagen resultante de la combinación de las diferentes imágenes polarizadas; el resultado de la combinación presenta una relación señal ruido (SNR) mayor que la relación SNR de cada imagen, que contribuye a que la precisión obtenida en los puntos de control sea mayor que aplicando SIFT sobre cada imagen polarizada.

Una estrategia para hacer más eficiente la automatización del proceso de generación del modelo de orientación absoluta es abordar el problema a través de SIFT, pero aplicando una optimización que identifique con precisión un número elevado de puntos al correlacionar imágenes procedentes de diferentes fuentes. Lowe (2004) propone una serie de valores por defecto

para los parámetros de SIFT, pero May et al. (2010) exponen que una optimización de los parámetros en función de la naturaleza de las imágenes y el tipo de aplicación permitiría mejores resultados. SIFT se controla a través de 17 parámetros (May et al. 2010); determinar el valor óptimo para cada parámetro implicaría millones de pruebas con imágenes, por lo que los autores investigan la influencia de los parámetros más representativos en un conjunto de imágenes en particular. Se han llevado a cabo numerosos trabajos de investigación sobre optimización en diversos campos, Yi et al. (2008) propone un criterio de restricción de escalas (nScales) para correlacionar puntos clave; Cheung and Hamarneh (2009) presentan una extensión para el caso de imágenes multimodales, utilizando histogramas multidimensionales para crear los descriptores de puntos clave. Jagadish and Sinzinger (2008) trabajan con imágenes con alto rango dinámico (HDR), adaptan el detector a este tipo de imágenes y modifican el umbral de rechazo del vecino más próximo (NNDR) a 0.6, lo que les permite incrementar la precisión del algoritmo. Battiatto et al. (2007) y Heipke (1997) prueban varios valores del umbral de rechazo mediante experimentación, e igualmente comprueban que disminuyendo el umbral mínimo de contraste, se reduce el número de puntos detectados, pero son más estables. Park et al. (2008) optimizan los parámetros de SIFT para identificar huellas dactilares, utilizando 4 octavas con 5 escalas y un valor sigma de 1.8, comprobando que valores mayores de sigma reduce el número de características. Sima and Buckley (2013) y May et al. (2010) exponen, de forma general, que los parámetros con mayor influencia en el funcionamiento del algoritmo son sigma, escalas por octava, umbral de contraste, umbral de rechazo del vecino más próximo; en el caso de imágenes aéreas, estos autores sostienen que el umbral mínimo de contraste, escalas por octava y sigma son los parámetros más significativos, pero son necesarios estudios complementarios para optimizarlos y contrastar su utilidad frente a diferentes tipos de imágenes y aplicaciones. El umbral de contraste influye en la ejecución del algoritmo SIFT cuando se aplica en imágenes aéreas no urbanas, como pastizales, donde la imagen está "mal texturizada"; Lingua et al. (2009b) y Cesetti et al. (2010) proponen métodos para corregir automáticamente el umbral de contraste. Liu et al. (2008) llevan a cabo una optimización del algoritmo para correlacionar imágenes SAR multitemporales en los que los píxeles presentan mayor correlación con sus píxeles vecinos que en el caso de imágenes ópticas, modificando los valores por defecto del umbral de rechazo del vecino más próximo (empleando el valor 1.2 frente a 0.8), el número de escalas varía entre 2 y 15 y el tamaño de la matriz de histogramas entre 2 y 22; los experimentos muestran que aumentar el tamaño de la matriz de histogramas no influye significativamente en el resultado, pero aumentar el número de escalas sí mejora la eficiencia de SIFT en imágenes SAR multi-

temporales; el resultado de la optimización es un incremento en el número de correlaciones detectadas, y un algoritmo más robusto a la presencia de ruido en la imagen.

Tras la revisión bibliográfica de algoritmos desarrollados en los últimos años para correlacionar imágenes ópticas multitemporales, sin métrica precisa, tomadas de múltiples fuentes, teniendo como objetivo final la generación automática de imágenes con métrica, los trabajos desarrollados son escasos, y se puede concluir que algunos aspectos necesitan mejorarse.

Capítulo 3

Materiales y métodos

3.1. Integración de ortofotografías procedentes de varios orígenes en un sistema universal

3.1.1. Materiales

El área de trabajo seleccionada comprende toda la Comunidad Autónoma de Andalucía. Se han empleados dos subconjuntos de ortofotos. Un primer subconjunto está constituido por 2.744 ortofotos generadas en el año 2004, dentro del espectro visible; la resolución espacial es de 1 metro, dimensión media de 7.600x5.000 píxeles y georeferenciación *European Datum 1950* (ED50) con sistema de proyección Universal Transversa de Mercator (UTM). El segundo subconjunto está constituido por una ortofoto generada en el año 2007, dentro del espectro visible, con el mismo sistema de referencia y proyección que la anterior, con resolución espacial de 15 cm y dimensión 30.188x17.812 píxeles, ubicada en las coordenadas geográficas 38°15'42.46"N; 4°40'46.94"W, en la provincia de Córdoba (ver figura 3.1).

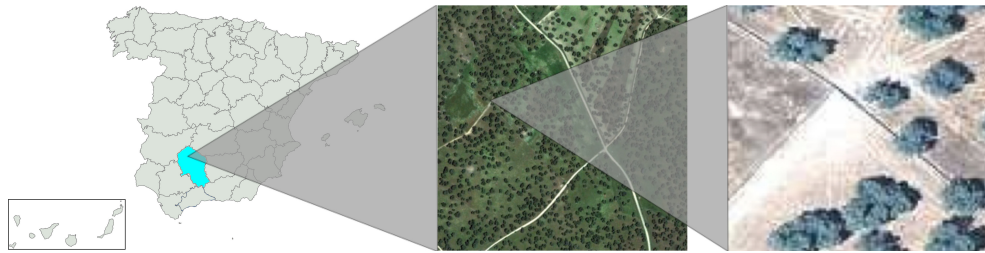


Figura 3.1: Localización geográfica de una ortofoto de 15cm de resolución de un área de la provincia de Córdoba

El equipamiento informático hardware que se empleó para este estudio está constituido por un ordenador de sobremesa convencional Intel Core 2, 1.86 Ghz, 4GB de RAM, con sistema operativo Windows XP.

Las herramientas software empleadas han sido el lenguaje de programación perl¹. Diseñado por Larry Wall en 1987, es un lenguaje de propósito general con sintaxis similar a C, awk y sed. Es fácil de usar, eficiente y completo, interpretado, soporta programación estructurada, como la programación orientada a objetos y la programación funcional. Es software libre, tiene licencia GNU y es multiplataforma.

Para llevar a cabo manipulaciones más específicas de las ortofotos se han empleado los paquetes de software multiplataforma y de código abierto Imagemagick², GDAL³ y libgeo-coordinates-utm-perl⁴. Imagemagick es un conjunto de utilidades que permite leer y manipular imágenes a través de líneas de comandos, permitiendo a través de los múltiples parámetros combinar operaciones de conversión de formato, edición, y composición de imágenes. GDAL es una librería de utilidades de lectura y manipulación de datos geoespaciales. Libgeo-coordinates-utm-perl es una librería de perl para manipular coordenadas UTM. Otra herramienta software empleada es Orto_pnoa_Etrs89_vs_Ed50 (Hernández-López et al. 2006), desarrollado en la Universidad de Castilla. Se emplea para convertir de sistema de referencia ED50 a ETRS89 y viceversa.

¹<http://www.perl.org/>, accedido 26 Noviembre 2013

²<http://www.imagemagick.org>, accedido 26 Noviembre 2013

³<http://www.gdal.org/>, accedido 26 Noviembre 2013

⁴<http://packages.ubuntu.com/uk/source/lucid/all/libgeo-coordinates-utm-perl>, accedido 10 Abril 2014

3.1.2. Principio básico de una estructura *Quadtree* en Google Maps

Se ha utilizado como elemento de referencia para integrar fotografías aéreas el mosaico creado por Google Maps, que está constituido principalmente por imágenes satélite y fotografías aéreas, ambas de actualización periódica; son imágenes de 256x256 píxeles (Aydin et al. 2008), denominadas teselas, con proyección geográfica de Mercator y sistema de referencia WGS84.

Las teselas se estructuran en una jerarquía en árbol de cuatro ramas (Elissalde 2007, Samet 1984), como se ilustra en la figura 3.2, donde los niveles inferiores incrementan la resolución espacial, y los niveles superiores la cobertura geográfica.

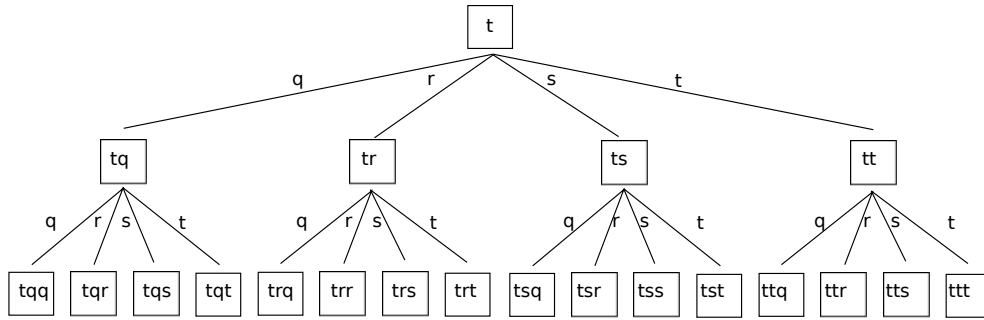


Figura 3.2: Árbol jerárquico de teselas

La propia estructura *quadtree* (cuatro ramas) lleva implícita un sistema de georeferenciación que determina las coordenadas centrales de cualquier tesela del árbol; se parte de dos variables x , y que toman valores en el rango $[0,1]$ sobre la tesela origen del mapa mundial, x toma valores de 0 a 1 de Oeste a Este, e y toma valores 0 a 1 de Norte a Sur. En función de la etiqueta de la tesela, es posible calcular las coordenadas (x,y) de su esquina superior izquierda, y calcular sus coordenadas geográficas⁵ aplicando la ecuación 3.1.

$$\begin{aligned} \text{latitud} &= 2 \cdot \arctan(e^{(1-2 \cdot y) \cdot \pi}) \cdot \frac{180}{\pi} - 90 \\ \text{longitud} &= 360 \cdot x - 180 \end{aligned} \quad (3.1)$$

3.1.3. Precisión geométrica del árbol jerárquico

Se han utilizado los datos de 588 puntos geodésicos levantados topográficamente, repartidos por la Comunidad Autónoma de Andalucía (Romero-

⁵<http://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb259689.aspx>, accedido 9 Diciembre 2013

Jiménez et al. 2011), y se evalúa la exactitud geométrica del árbol jerárquico *quadtree* aplicando las funciones de la ecuación 3.2, donde Et es el error total, Ex la exactitud posicional en la coordenada horizontal X, Ey es la exactitud posicional en la coordenada horizontal Y, (x_g, y_g) las coordenadas horizontales de un punto geodésico g identificado en un mapa, y (x'_g, y'_g) las coordenadas del punto geodésico g según otra fuente de mayor precisión. Para el estudio de los errores hemos utilizado la distribución normal de cada variable.

$$\begin{aligned} Et(g) &= \sqrt{(x'_g - x_g)^2 + (y'_g - y_g)^2} \\ Ex(g) &= x'_g - x_g \\ Ey(g) &= y'_g - y_g \end{aligned} \tag{3.2}$$

3.2. Tratamiento de imágenes procedentes de UAVs y optimización de los procedimientos de generación automática de imágenes con métrica

3.2.1. Software de correlación de imágenes: ImageJ

Se ha empleado la aplicación *Fiji*⁶, distribución del software libre *ImageJ*⁷ (Abràmoff et al. 2004), junto al plugin *Feature Extraction*, el cual implementa SIFT con filtrado RANSAC, para detectar puntos claves en imágenes y correlacionarlos entre sí. La documentación de *Feature Extraction* se puede consultar en la web ⁸.

3.2.2. Plataforma aérea, conjunto de imágenes y ubicación geográfica

Se han utilizado dos conjuntos de imágenes de una misma área geográfica, correspondiendo cada conjunto a años diferentes.

Como plataforma aérea se ha utilizado un aeromodelo *Skywalker EPO FPV*⁹, capaz de realizar vuelos de 30-45 minutos, cuyas especificaciones se indica en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas de la plataforma Skywalker FPV

Envergadura	1.68m
Hélice	9x6
Batería	6S 5000 mah
Variador	85A
Carga Máxima	3.050g
Motor	1100kw
Servomotores	8

Contiene una placa autopiloto de hardware libre *ArduPilot Mega* v1.4

⁶<http://fiji.sc/Fiji>, accedido 5 Marzo 2014

⁷<http://imagej.nih.gov/ij/index.html>, accedido 3 Marzo 2014

⁸http://fiji.sc/wiki/index.php/Feature_Extraction, accedido 3 Marzo 2014

⁹<http://www.skywalker-model.com/>, accedido 1 Diciembre 2013

(APM)¹⁰, que proporciona un vuelo seguro, estable y robusto una vez configurada. Se incorpora al sistema una placa de hardware libre *On Screen Display* (OSD)¹¹, sensor de velocidad del aire¹², sensores de voltaje e intensidad¹³, un emisor de video inalámbrico, y una cámara boscam HD19 ExplorerHD Full HD 1080p FPV¹⁴ para pilotaje manual.

Para maniobrar manualmente el aeromodelo se empleó una emisora de radiocontrol (RC) Futaba FF9¹⁵ y receptor compatible, operando en la frecuencia de 433Mhz. El GCS que se utilizó fue el software de código abierto *Mission Planner*¹⁶, que se comunica con el UAV de forma inalámbrica utilizando módulos Xbee 868 Mhz¹⁷. Los ficheros de telemetría generados por el GCS se filtran y procesan en un entorno linux (Ubuntu 12.04 LTS), a través de shell scripts y algoritmos implementados en perl.

Las imágenes aéreas se tomaron con una cámara GoPro YHDC5170¹⁸, situada en la parte inferior del fuselaje del aeromodelo con orientación cenital. Es una cámara robusta, compacta, bajo peso, universal, bajo coste, alta definición, con un objetivo de gran angular, lo que da lugar a gran deformación de las imágenes. Las especificaciones de la cámara se muestran en la tabla 3.2.

Este conjunto de imágenes se adquirió en Noviembre de 2011, en la provincia de Málaga (al sur de Andalucía, España), con coordenadas WGS84 36°39'41"N; 4°27'55"W (ver figura 3.3).



Figura 3.3: Localización del área de adquisición de imágenes obtenidas con cámara GoPro

¹⁰<http://www.ardupilot.co.uk/>, <http://code.google.com/p/ardupilot-mega/>, accedido 1 Diciembre 2013

¹¹<http://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/OSD>, accedido 4 Marzo 2014

¹²<http://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/Airspeed>, accedido 4 Marzo 2014

¹³<http://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/Voltage>, accedido 4 Marzo 2014

¹⁴<http://www.boscamhobby.com/hd19.html#.UxW-pbOd7Lc>, accedido 4 Marzo 2014

¹⁵<http://www.futaba-rc.com/>, accedido 3 Marzo 2014

¹⁶<http://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/Mission>, accedido 6 Diciembre 2013

¹⁷<http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/point-multipoint-rfmodules/xbee-pro-868>, accedido 6 Diciembre 2013

¹⁸<http://es.gopro.com/>, accedido 6 Diciembre 2013

El UAV toma fotos cada dos segundos, variando la altitud y orientación del aeromodelo con objeto de disponer de imágenes similares del mismo área geográfica, tomadas desde diversos puntos de vista y a diferente altura. La tabla 3.2 define unos criterios en base a altitud, cabeceo y alabeo que deben cumplir las fotografías. De todas las fotografías que cumplen los criterios, se seleccionan 25 aleatoriamente para generar un modelo optimizado de los parámetros del algoritmo SIFT, y otras 10 para validar el modelo.

Como referencia de imagen fotogramétrica con geometría conocida se ha utilizado una ortofotografía de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio¹⁹. Las especificaciones de la ortofoto se puede ver en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Especificaciones técnicas del conjunto de imágenes, criterios, y cámara GoPro

Especificación de la cámara GoPro	
Tamaño del sensor	1/2.5"
Campo de Visión	170°
Resolución	2.592px x 1.944 px
Distancia focal	5mm
Auto disparo	2 segundos
Criterio a cumplir por las imágenes aéreas	
Altitud nivel del mar	153m-378m
Cabeceo	-3° a 15°
Alabeo	-16° a 29°
Imágenes que cumplen el criterio	25
Imágenes adicionales (que cumplen el criterio) para validación	10
Especificaciones de la ortofoto	
Nombre	1067-1-1 (año 2010)
Resolución	15.460px x 9.900px
Resolución de pixel	0.5m
Resolución espectral	3 (rojo, verde, azul)
Coordenadas centrales	367.775, 4.056.605 (UTM 30N ETRS 1989)
Extensión	7.730m (horizontal), 4.950m (vertical)

¹⁹<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam>, accedido 6 Diciembre 2013

3.2.3. Análisis estadístico aplicado a la optimización de parámetros

Con objeto de cuantificar y contrastar la potencial optimización de SIFT, se lleva a cabo un análisis de la varianza de un diseño factorial, considerando 3 niveles de nScale y 3 niveles de sigma, y del que se realizó el correspondiente estudio estadístico en el conjunto de validación.

3.3. Contraste de la optimización de los procedimientos de generación automática de imágenes con métrica

3.3.1. Plataforma aérea, conjunto de imágenes y ubicación geográfica

Se utilizaron dos ortofotografías de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio que contienen el área de estudio, cuya especificación se puede observar en la tabla 3.3; también se utilizaron 2 modelos digitales del terreno, uno obtenido de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (tabla 3.4), y otro del Instituto Geográfico Nacional (IGN) (tabla 3.5).

Tabla 3.3: Especificaciones técnicas de una ortofoto de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio

Especificaciones de la ortofoto	
Nombre	882-3-3, 882-3-4 (año 2010)
Resolución	15.140px x 9.880px
Resolución de pixel	0.5m/píxel
Resolución espectral	3 (rojo, verde, azul)
Coordenadas centrales	385.125, 4.232.060 y 385.055, 4.227.435 y (UTM 30N ETRS 1989)
Extensión	7.570m (horizontal), 4.940m (vertical)

Tabla 3.4: Especificaciones técnicas de un modelo digital del terreno de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Coordenadas en UTM 30N ETRS 1989

Nombre	882-3-3.xyz, 882-3-4.xyz (año 2010-2011) (formato ASCII)
Coordenadas esquina superior izquierda	381.260, 4.234.540
Coordenadas esquina inferior derecha	388.900, 4.224.980
Paso de malla	10m

Tabla 3.5: Especificaciones técnicas del modelo digital del terreno del IGN. Coordenadas en UTM 30N ETRS 1989

Nombre	MDT05-0882-H30.asc (año 2010-2011) (formato ASCII Grid)
Coordenadas esquina superior izquierda	366.397, 4.244.202
Coordenadas esquina inferior derecha	396.602, 4.224.597
Paso de malla	5m

Se ha utilizado una plataforma aérea Skywalker X8²⁰, cuyas especificaciones técnicas se pueden ver en la tabla 3.6

Tabla 3.6: Especificaciones técnicas de la plataforma Skywalker X8

Envergadura	2.12m
Hélice	12x6 - 13x8
Batería	4S 3000mah - 6S 5000 mah
Variador	40 - 70A
Carga Máxima	3.000g
Servomotores	4

Esta plataforma es capaz de realizar vuelos de 40-45 minutos con una carga de 3.000g. Contiene una placa autopiloto APM, ya descrita en la sección 3.2.2, al igual que sistemas y sensores para control del UAV (emisora de radiocontrol, estación GCS, sensor de velocidad del aire,...).

Las imágenes aéreas se tomaron con una cámara Canon IXUS 220HS ²¹, cuyas especificaciones técnicas se muestran en la tabla 3.7. Como firmware

²⁰<http://www.skywalker-model.com/>, accedido 4 Enero 2014

²¹<http://www.canon.es/>, accedido 4 Enero 2013

se utilizó CHDK ²² (canon hack development Kit), kit de desarrollo que permite acceder a múltiples funciones de la cámara e implementar funciones adicionales.

Tabla 3.7: Especificaciones técnicas de una cámara Canon IXUS 220HS

Resolución	4.000x3.000 píxeles
Tamaño del sensor	6.17 x 4.55 mm
Distancia focal	4.3 - 21.5 mm
Velocidad de obturación	15-1/2000 seg

Estas imágenes fueron adquiridas el 23 de Julio de 2013 en la finca de Santa Clotilde, en el término municipal de Cardena (Córdoba), polígono 63 (parcela 5) y 64 (parcela 1), 255.6319 ha según el SIGPAC, con coordenadas 38°12'10.29"N; 4°17'11.79"W(ver figura 3.4).

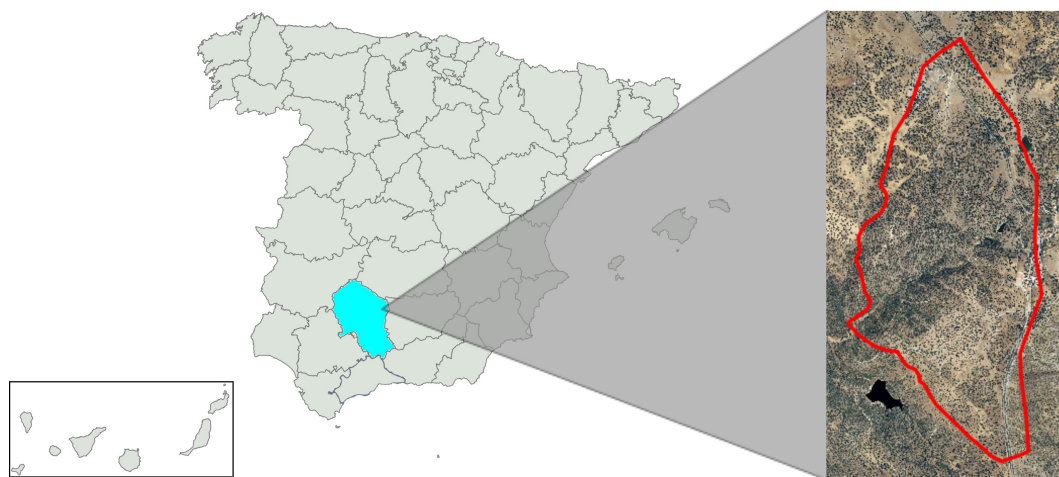


Figura 3.4: Ubicación geográfica de la finca Santa Clotilde en Cardena(Córdoba)

3.3.2. Parámetros del vuelo

Se deseaba una resolución aproximada de 12cm/píxel. El terreno de la finca presenta desniveles, por lo que la cota no es constante, el punto de mayor altura está a 757 metros, y el punto de menor altura 650 metros.

²²<http://chdk.wikia.com/wiki/CHDK>, accedido 4 Enero 2013

3.3.3. Validación del algoritmo *SIFT* optimizado

Se extraen regiones de la ortofoto de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, y utilizando ImageJ se correlacionan con las imágenes aéreas, con objeto de validar el modelo de optimización generado.

3.3.4. Software libre de creación de ortofotografía: MicMac

MicMac²³ es un conjunto de utilidades fotogramétricas que se pueden emplear en contextos heterogéneos, por lo que ofrece múltiples posibilidades y opciones fotogramétricas; en el anexo D.7 se describen las utilidades más características y que se han empleado para generar ortofotos en el desarrollo de esta tesis.

3.3.5. Equipamiento Hardware y Herramientas Software

Se ha utilizado un servidor con 40GB de memoria RAM, 2 CPUs Intel Xeon E5620 2.40GHz 64bits, disco duro 5TB y Ubuntu 10.10, y se ha creado una máquina virtual específica de 16GB de memoria RAM, con disco duro de 1.8TB, CPU Intel Xeon E5620 2.40Ghz 64 bits, sistema operativo Ubuntu 12.04 LTS, en la que se han ejecutado los procesos necesarios para generar la ortofoto; también se ha probado satisfactoriamente en MacOSX 10.7.5.

3.3.6. Precisión geométrica de la ortofoto

Se ha utilizado el test de calidad posicional NSSDA (Federal Geographic Data Committee 1998c) en la ortofoto resultante, tanto de la componente horizontal como vertical.

²³<http://www.micmac.ign.fr/>, accedido 5 Marzo 2014

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1. Integración de ortofotografías procedentes de varios orígenes en un sistema universal

4.1.1. Generación del árbol de teselas

Partiendo de 2.744 ortofotos generadas en el año 2004 y resolución 1m, formato jpg y archivo *world file* jgw asociado, se han generado 12 subárboles jerárquicos de teselas compatibles con plataformas universales, concretamente con Google Maps, desde el nivel 8 hasta el nivel 15 del árbol jerárquico mundial. Dos subárboles se actualizaron con una ortofoto más reciente del año 2007 y resolución 15cm, añadiendo más niveles en algunas de sus ramas.

Para ello, se definieron varias fases o etapas de tratamiento de la información espacial, diseñando y desarrollando los algoritmos necesarios para completar cada etapa.

4.1.1.1. Pasos previos. Sistema de proyección y coordenadas

Se propone una sistemática de transformación al sistema de referencia ETRS89, y una transformación del sistema de proyección UTM a proyección geográfica de Mercator para cada ortofoto, a través de un archivo por lotes, obteniéndose un conjunto de ficheros tif con sus correspondientes ficheros *world file* tfw, a los que se realiza una conversión de formato tif a jpg, y un renombrado del fichero *world file* tfw a jgw.

4.1.1.2. Generación de un subárbol

Partiendo del árbol general que presenta al mapa del mundo como tesela origen, se define qué subárbol S se desea generar; para ello, se debe especificar el identificador “a” del nodo raíz del subárbol S y el número de niveles N a generar (es decir, la profundidad del árbol), como ilustra la figura 4.1.

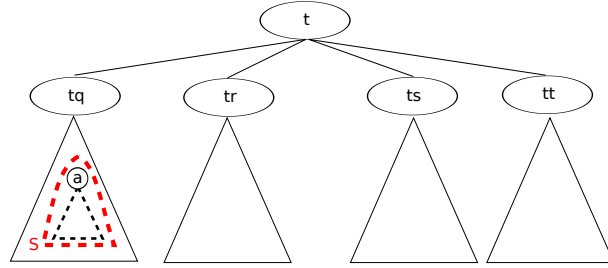


Figura 4.1: Subrama del árbol general de teselas

El orden de inserción de las teselas en el árbol no influye en la estructura y organización del árbol final (Bereuter and Weibel 2012). En esta tesis, se ha propuesto un modelo de abajo hacia arriba que ha consistido en generar en primer lugar todas las teselas hoja del árbol.

Generación de los identificadores de las teselas hoja. Se han generado los identificadores de las 4^N teselas del nivel N utilizando un algoritmo recursivo diseñado “ad hoc”; el diagrama de flujo que proponemos se puede observar en la figura 4.2.

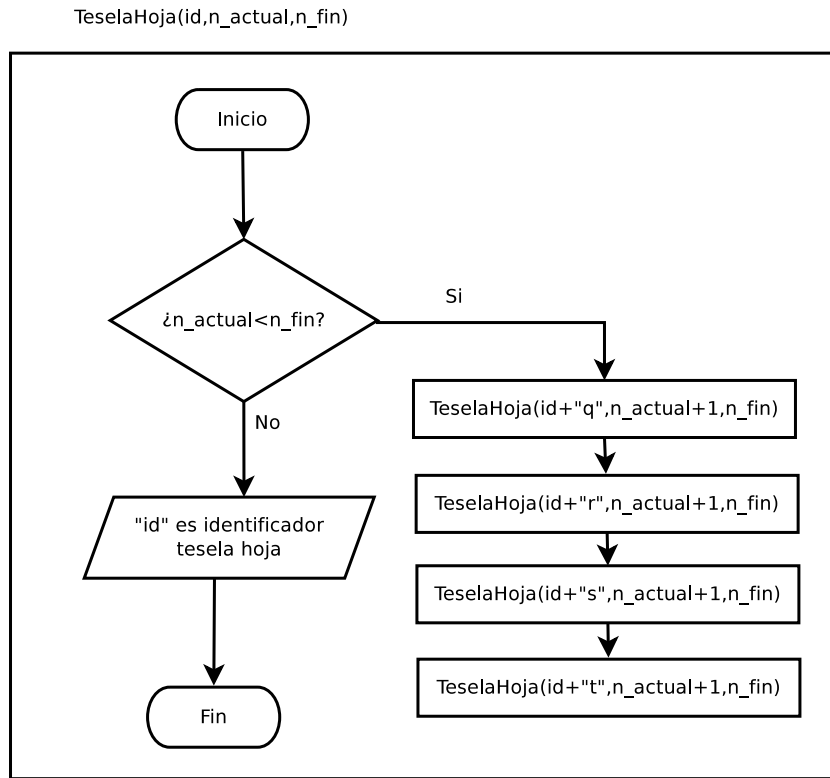


Figura 4.2: Diagrama de flujo del algoritmo generador de identificadores de teselas

El algoritmo comprueba si el nivel en el que se encuentra actualmente (n_actual) coincide con la profundidad máxima que se requiere (n_fin), en caso afirmativo se ha llegado al nodo hoja del subárbol a generar; en caso contrario, se realizan cuatro llamadas recursivas al algoritmo para recorrer las ramas hijas q-r-s-t, pasando como parámetros el nivel actual incrementado en uno, el identificador actual concatenando la letra correspondiente en función de la rama a recorrer, y el nivel máximo requerido. Básicamente, el algoritmo hace un recorrido preorden del árbol hasta llegar a la profundidad requerida.

Generación de teselas hoja. En la figura 4.3 se puede observar el diagrama de flujo del algoritmo que proponemos para generar las teselas hoja.

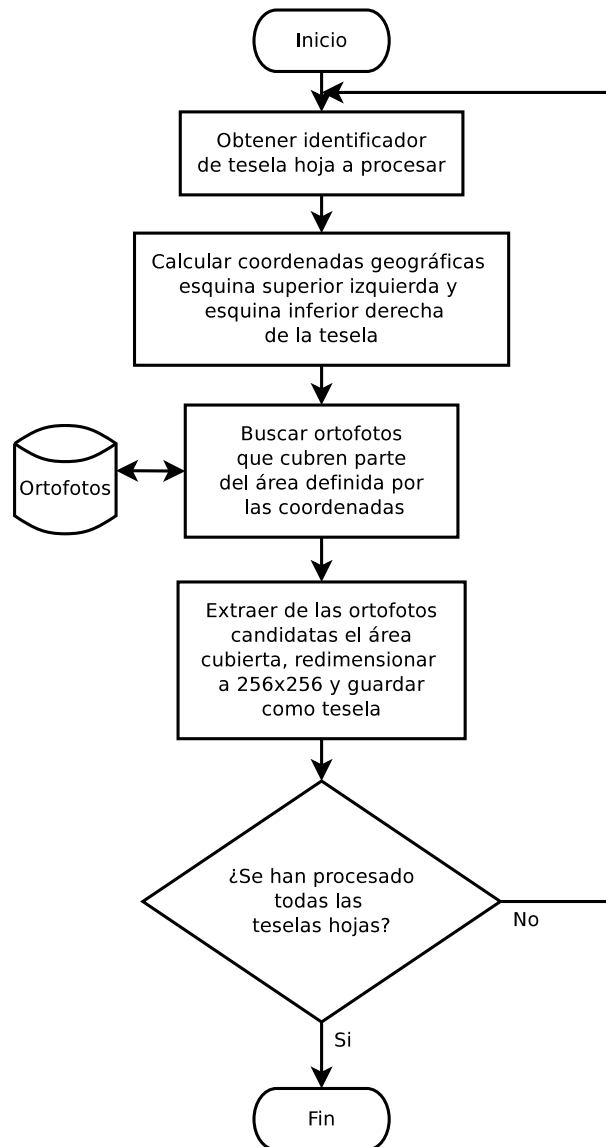


Figura 4.3: Diagrama de flujo del algoritmo de generación de teselas hoja

En esta fase ya se habrán generado los identificadores de todas las teselas hoja a generar, nuestra propuesta permite calcular las coordenadas de la esquina superior izquierda siguiendo la metodología descrita en el apartado 3.1.2. Para generar las coordenadas de la esquina inferior derecha, se diseña e implementa una función recursiva que obtiene el identificador de

la tesela adyacente del mismo nivel con ubicación geográfica abajo y a la derecha de la tesela actual, cuyo pseudocódigo se muestra a continuación en la función *AbaDer*, que a su vez hace uso de las funciones auxiliares recursivas *Der* y *Aba* para obtener el identificador de las teselas adyacentes del mismo nivel, cuya ubicación geográfica está a la derecha, en el caso de *Der*, y abajo en el caso de *Aba*; una vez se obtiene el identificador, se obtienen las coordenadas geográficas aplicando lo comentado en el apartado 3.1.2.

Funcion AbaDer (id_tesela)

Quitar ultima letra del identificador de la tesela, y guardar el resultado en la variable id2_tesela
 Si la ultima letra es “q”, Devolver id2_tesela, añadiendo “s” al final
 Si la ultima letra es “r”, Devolver Der(id2_tesela), añadiendo “t” al final
 Si la ultima letra es “s”, Devolver AbaDer(id2_tesela), añadiendo “q” al final
 Si la ultima letra es “t”, Devolver Aba(id2_tesela), añadiendo “r” al final

Funcion Der (id_tesela)

Quitar ultima letra del identificador de la tesela, y guardar el resultado en la variable id2_tesela
 Si la ultima letra es “q”, Devolver id2_tesela, añadiendo “r” al final
 Si la ultima letra es “r”, Devolver Der(id2_tesela), añadiendo “q” al final
 Si la ultima letra es “s”, Devolver Der(id2_tesela), añadiendo “t” al final
 Si la ultima letra es “t”, Devolver id2_tesela, añadiendo “s” al final

Funcion Aba (id_tesela)

Quitar ultima letra del identificador de la tesela, y guardar el resultado en la variable id2_tesela
 Si la ultima letra es “q”, Devolver id2_tesela, añadiendo “t” al final
 Si la ultima letra es “r”, Devolver id2_tesela, añadiendo “s” al final
 Si la ultima letra es “s”, Devolver Aba(id2_tesela), añadiendo “r” al final
 Si la ultima letra es “t”, Devolver Aba(id2_tesela), añadiendo “q” al final

Conociendo la región geográfica definida por las coordenadas de las dos esquinas de una tesela, proponemos una metodología de localización y extracción de las ortofotos que la contengan, ya sea parcial o totalmente, redimensionando a 256x256 píxeles y generando la tesela. En caso de que ninguna ortofoto contenga la región, se genera una tesela negra.

La figura 4.4 es un ejemplo ilustrado de aplicación del algoritmo, en la que se muestra la tesela “tqssrrrtqstqssqs”.

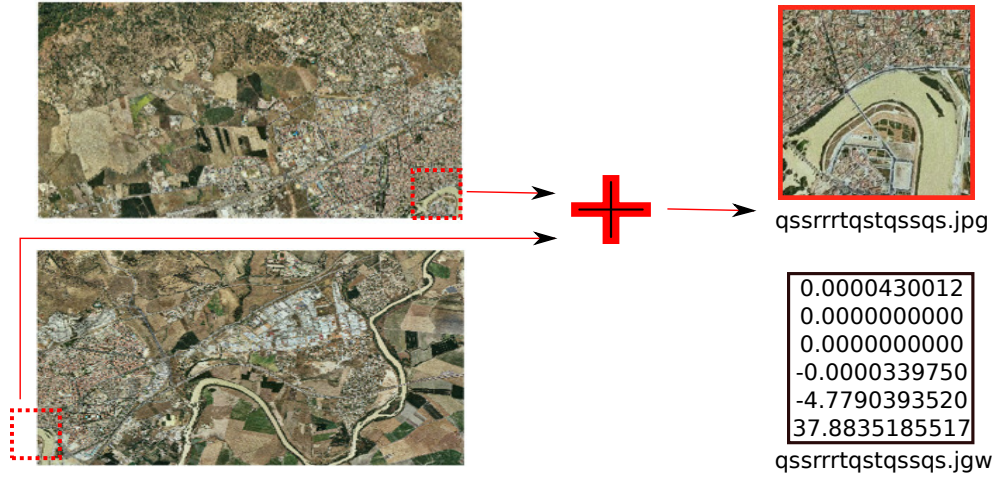


Figura 4.4: Generación de la tesela hoja “tqssrrrtqstqssqs”

Generación de las teselas del resto de niveles . Una vez generadas todas las teselas hoja, se procede a generar las teselas de los niveles superiores del árbol. El primer paso del algoritmo propuesto es marcar todas las teselas hoja del nivel N como no procesadas. A continuación, el algoritmo busca un cuarteto de teselas no procesadas de un nivel cualquiera $M \leq N$ (en la primera iteración del algoritmo todas las teselas son del nivel N, y están sin procesar), que tengan identificadores IDq, IDr, IDs, IDt, siendo ID un prefijo común a estas cuatro formado por combinación de las letras “q,r,s,t”; se combinan entre sí generando una tesela intermedia de resolución 512x512 píxeles. Esta tesela intermedia se redimensiona a 256x256 píxeles generando una tesela del nivel M-1 con identificador ID, y las cuatro teselas se marcan como procesadas; se repite todo el proceso con otro cuarteto de teselas ID’q, ID’r, ID’s, ID’t, y así sucesivamente. En las primeras iteraciones del algoritmo, existirán teselas hoja del nivel N no procesadas, teselas del nivel N procesadas, teselas del nivel N-1 procesadas y no procesadas; a medida que el algoritmo siga iterando, llegará un momento que no existan más cuartetos de teselas del nivel N por procesar, por lo que se habrá generado el nivel N-1 por completo. El algoritmo termina cuando no quedan cuartetos de teselas por procesar. En la figura 4.5 se muestra un diagrama de flujo del algoritmo descrito.

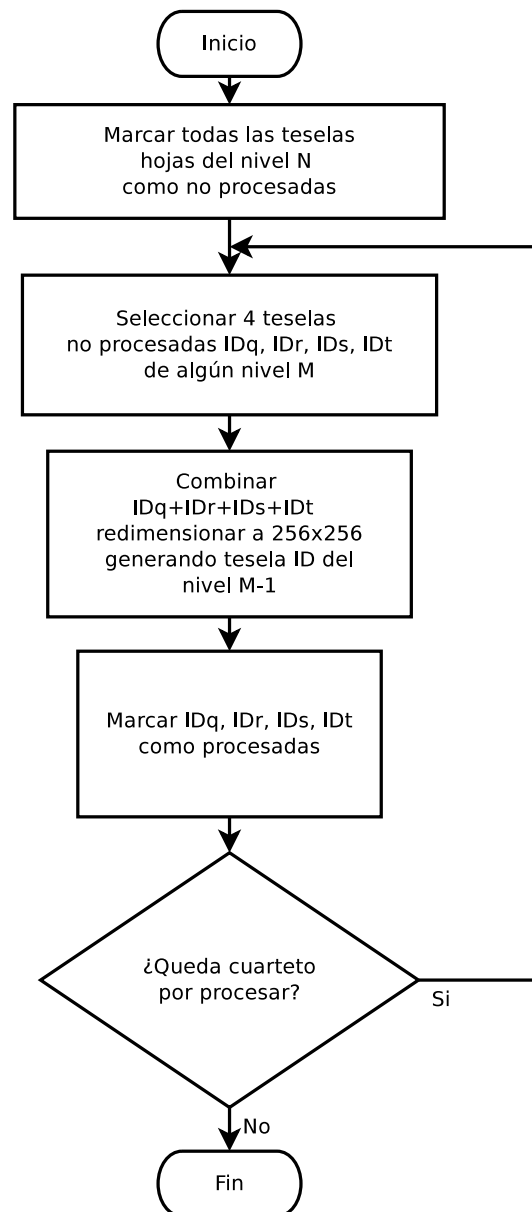


Figura 4.5: Diagrama de flujo del algoritmo de generación de teselas de niveles superiores

En la figura 4.6 se muestra un ejemplo del resultado obtenido al aplicar el algoritmo propuesto sobre un cuarteto de teselas, en el que se detallan los identificadores correspondientes a cada una.

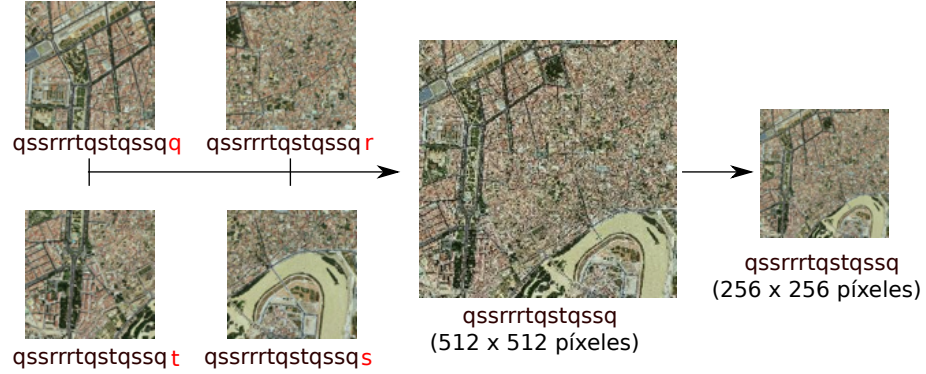


Figura 4.6: Ejemplo de generación de una tesela tqssrrrtqstqssq a partir de sus teselas hijas

Actualización del mosaico. Se proporciona un conjunto “O” de ortofotos con el que llevar a cabo una actualización del árbol jerárquico, siendo “S” el área cubierta por estas ortofotos, y n_1, n_2 los niveles superior e inferior del árbol que se va a actualizar. El primer paso es localizar el conjunto de nodos “p” del nivel n_1 que contenga parte del área “S” y que se deseen actualizar. Una vez localizados, para cada nodo “p” se define un subárbol “A”, siendo “p” el nodo raíz, y del que cuelgan sus nodos hijos hasta un total de $|n_2 - n_1|$ niveles por debajo. La figura 4.7 muestra un ejemplo en el que hay un sólo nodo “p” y un sólo árbol “A” a actualizar.

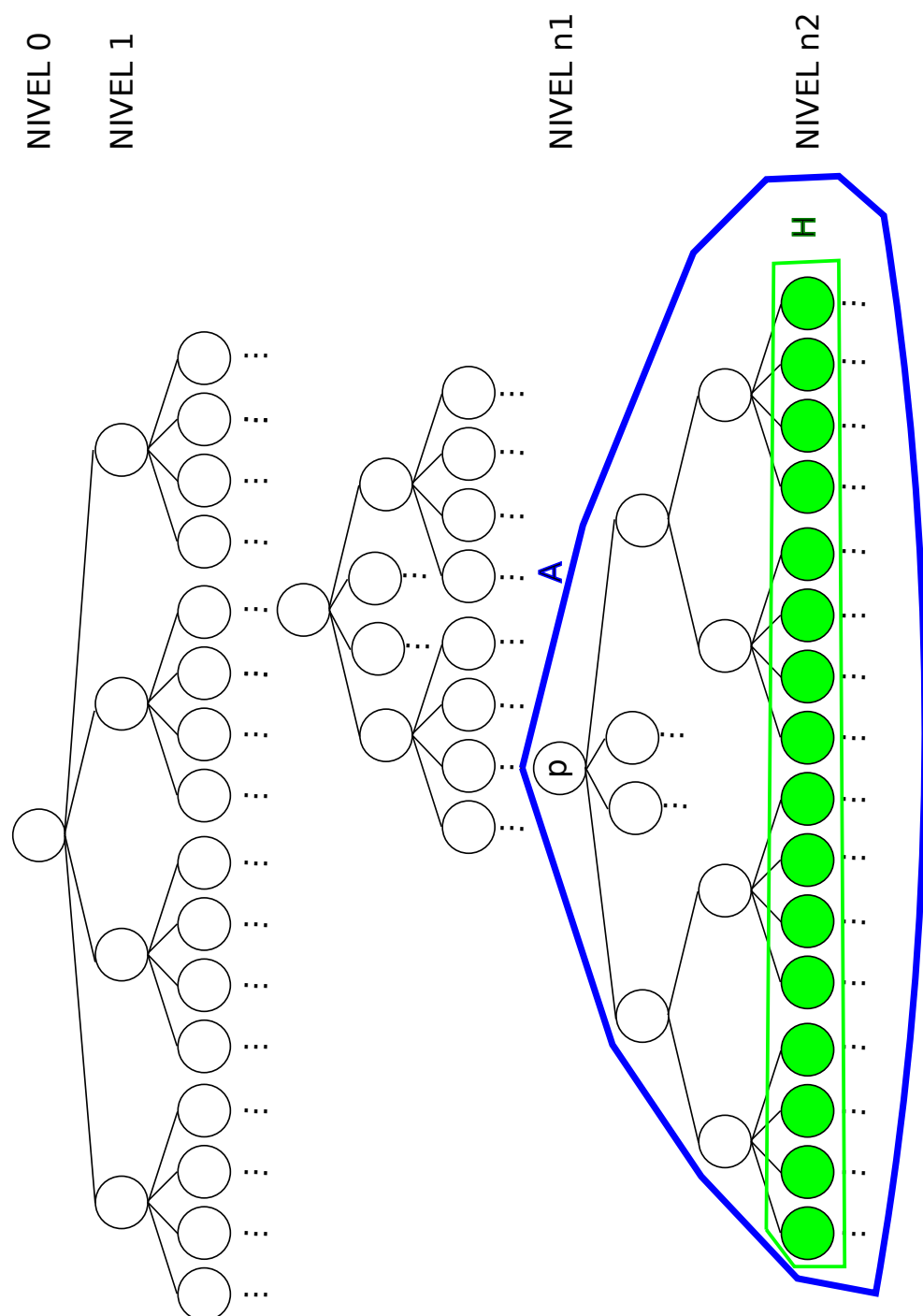


Figura 4.7: Árbol jerárquico global y subárbol a actualizar. En color azul se muestra el subárbol a actualizar, en verde se muestran las teselas hoja

Una vez definido el subárbol “A”, se define “H” como el conjunto formado por todas las teselas hoja de “A”. Para cada tesela $h \in H$, si existe alguna ortofoto $o \in O$ con una región s común con parte de la tesela h , se actualiza la tesela h con la región s de o . Una vez actualizadas todas las teselas hoja, se procede a generar los niveles superiores del subárbol, sin superar el nivel $n1$ del árbol jerárquico global. La figura 4.8 presenta un diagrama de flujo del algoritmo.

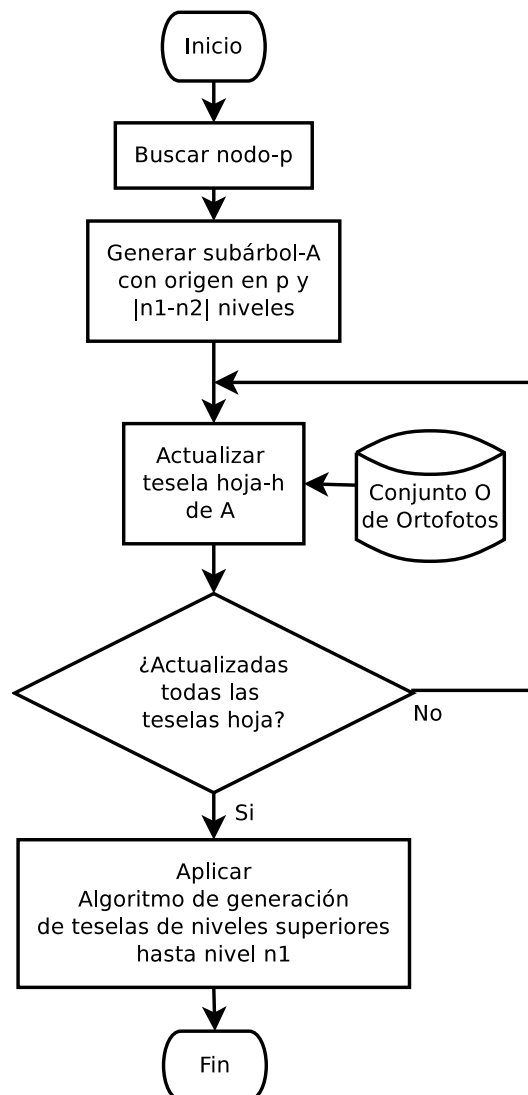


Figura 4.8: Diagrama de flujo del algoritmo de actualización del árbol

Optimización del algoritmo de generación de hojas/generación de niveles superiores/actualización del árbol. Para hacer más eficaces las operaciones sobre el árbol, se implementó un algoritmo que lleva a cabo los procedimientos de generación de hojas y niveles superiores en el caso de creación del árbol, o actualización de hojas y niveles superiores en el caso de actualización. En los apartados anteriores, hemos descrito la primera aproximación efectuada para generar el árbol, que comprende dos fases, una en la que se actúa sobre las hojas, y otra en la que se actúa sobre los niveles superiores, por lo que requeriría recorrer el árbol dos veces. Se unificaron las operaciones en un algoritmo recursivo que recorre en preorden cada una de las cuatro ramas del árbol, cuyo caso base es la generación de una tesela hoja. Una vez llega al caso base, genera/actualiza la tesela hoja y vuelve al punto de ejecución de la penúltima llamada. Cuando se han recorrido en preorden las cuatro ramas, se genera la tesela padre de las cuatro ramas. La figura 4.9 muestra el diagrama de flujo del algoritmo.

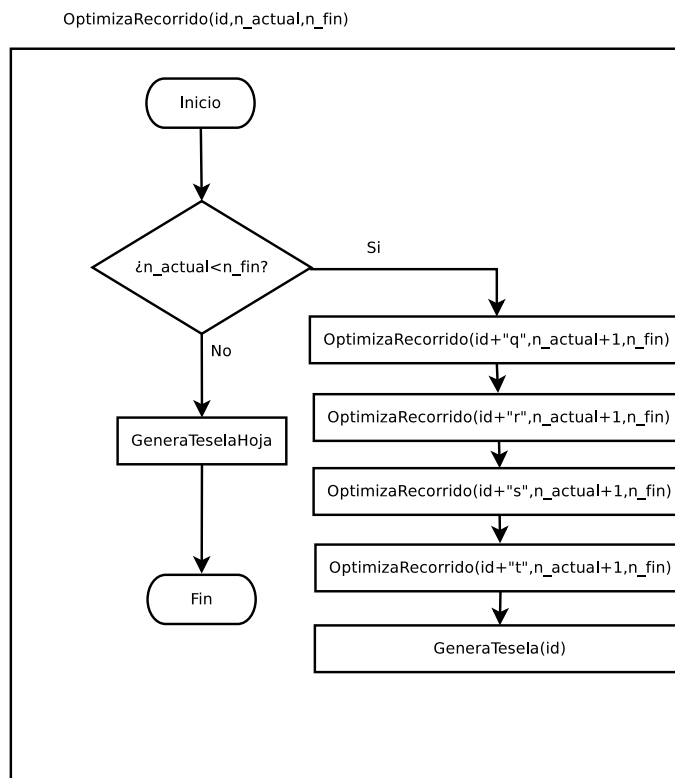


Figura 4.9: Diagrama de flujo del algoritmo optimizado generador/actualizador del árbol jerárquico

La figura 4.10 muestra un esquema de recorrido de una de las ramas de un

árbol de tres niveles, secuenciando con números el orden en el que se genera cada tesela

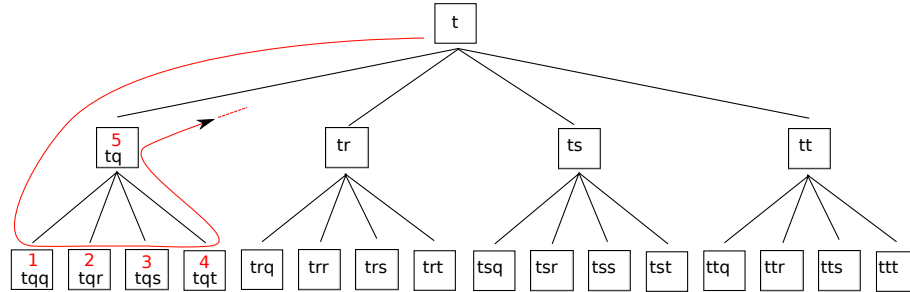


Figura 4.10: Recorrido optimizado del árbol, mostrando en qué orden se genera cada tesela.

Algunos autores proponen un algoritmo dividido en dos fases para generar el árbol: una primera fase en la que se generan las teselas hoja, y una segunda fase en la que se generan los niveles superiores (Sample and Ioup 2010); esta división implica una ejecución más ineficiente que la que hemos propuesto al ser necesario recorrer el árbol más de una vez. Otros autores emplean sistemas que permiten generar la jerarquía de forma paralela (arquitecturas con múltiples unidades de ejecución, sistemas distribuidos, ...), creando varias subtareas que se ejecutan simultáneamente (Guan et al. 2012, Sample and Ioup 2010); en nuestro caso, el algoritmo que hemos propuesto permite hacer uso de este tipo de arquitecturas sin requerir para ello grandes modificaciones, definiendo una cola de tareas que se inicializa recorriendo el árbol recursivamente e insertando las tareas de creación de teselas hoja y niveles superiores, para asignar posteriormente las tareas a cada unidad de ejecución disponible.

4.1.1.3. Resultado de la generación de los subárboles

Se generaron los niveles comprendidos entre 8 y 15 de 12 subárboles jerárquicos correspondiente a la región de Andalucía, con una resolución espacial máxima de un metro en las teselas del nivel 15. Las teselas origen de estos subárboles son: tqssrrqsq, tqssrrqst, tqssrrqsr, tqssrrqss, tqssrrtrr, tqssrrrtq, tqssrrrtt, tqssrrsq, tqssrrtr, tqssrrts, tqssrrsq, tqssrrst, como se muestra en la figura 4.11. Una vez optimizado el proceso, se generaron un total de 136.593 teselas con proyección geográfica de Mercator y sistema de referencia WGS84, para lo cual se necesitaron tres días y seis horas en un equipo Intel Core 2 a 1.86Ghz, con 4GB de RAM.

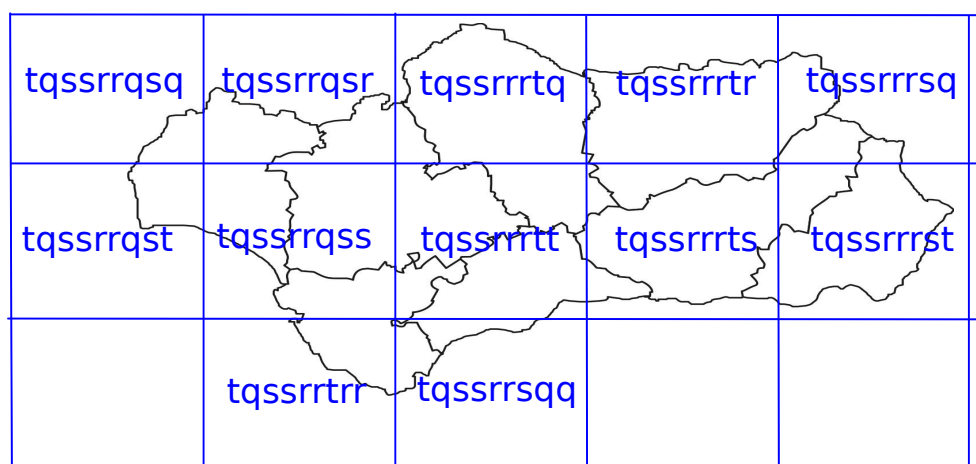


Figura 4.11: Cobertura geográfica de nodos origen de varios subárboles en la región de Andalucía

Una muestra de las teselas que se generaron se presenta en la figura 4.12, que presenta las teselas del camino seguido desde el nodo origen del subárbol tqssrrrtq hasta la tesela tqssrrrtqstqssqs.

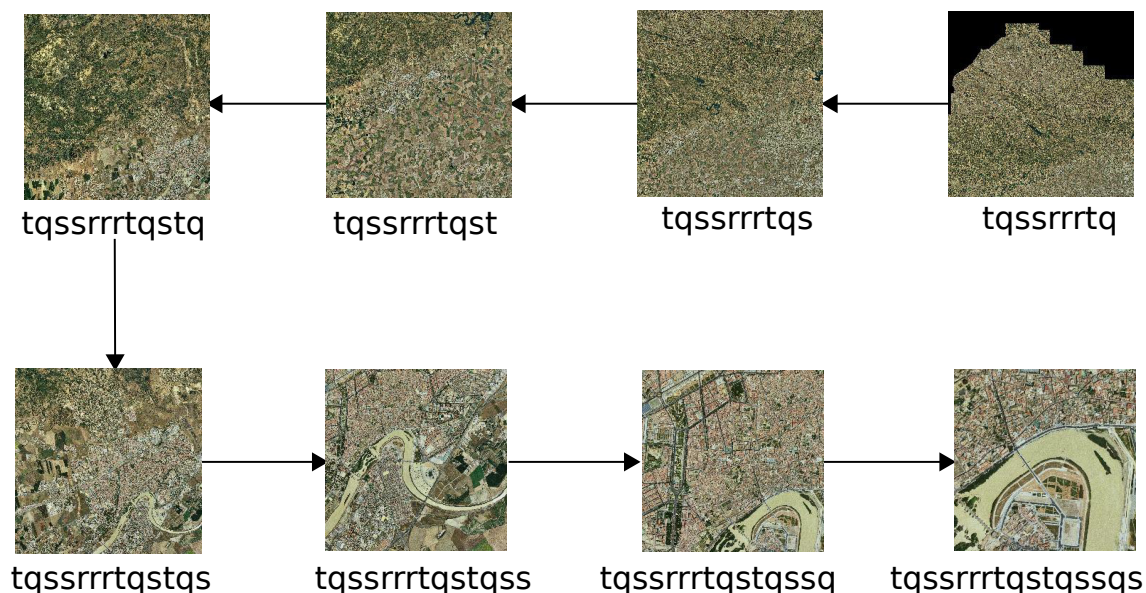


Figura 4.12: Teselas de la rama con tesela origen “tqssrrrtq” y tesela final “tqssrrrtqstqssqs”

Una vez generados los subárboles, se ha corroborado que el sistema propuesto verifica conclusiones de autores como Xu et al. (2012), que sostienen que el uso de jerarquías de teselas optimiza el tiempo de respuesta de servidores de mapas, ofreciéndose como una alternativa para almacenar y gestionar eficientemente volúmenes elevados de datos espaciales con múltiple resolución espacial y temporal, ya que las herramientas SIG tradicionales no son las más indicadas, como Yuan et al. (2011) exponen.

4.1.1.4. Resultado de la actualización del subárbol tqssrrrtq

Como se ha descrito anteriormente en la sección 3.1.1, se dispone de una ortofoto de 0.15m/píxel, proyección UTM y ED50, que se transformó al sistema de proyección geográfica de Mercator y WGS84, cuyo resultado se muestra en la figura 4.13. Concretamente, se desea actualizar las teselas hoja de nivel 15 que contengan el área geográfica de la nueva ortofoto, y añadir 5 niveles adicionales.

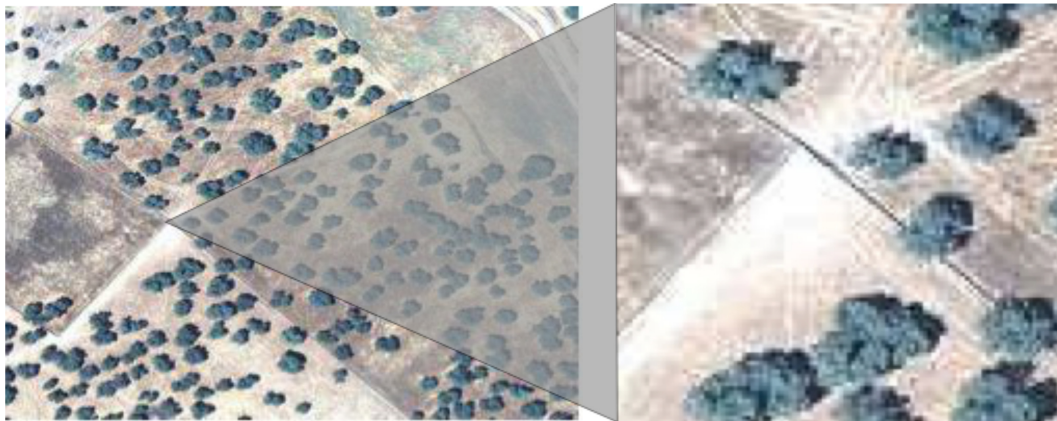


Figura 4.13: Ortofoto a incorporar en el árbol jerárquico

Aplicando la ecuación 3.1 y los algoritmos expuestos a lo largo de esta sección, se obtiene la cobertura geográfica de cada uno de los 12 subárboles, siendo `tqssrrrtq` el subárbol que contiene el área geográfica cubierta por la nueva ortofoto; descendiendo por las ramas del subárbol a las diferentes teselas de cada nivel, se calcula la cobertura geográfica de cada una de ellas y se obtiene que las teselas de nivel 15 a actualizar son `tqssrrrtqsqrqrqs` y `tqssrrrtqsqrqrtr`, que se muestran en la figura 4.14. Se añaden 5 niveles adicionales por debajo de estas dos teselas, siendo el nivel 20 el de mayor profundidad; de esta situación se deduce que actualizar el árbol, a partir de ortofotos de mayor resolución espacial con cobertura geográfica de zonas de mayor interés, hace que que no todas las ramas tengan la misma profundidad.



Figura 4.14: Teselas `tqssrrrtqsqrqrqs` (izquierda) y `tqssrrrtqsqrqrtr` (derecha), raíces de los dos subárboles a actualizar

La figura 4.15 muestra los dos subárboles una vez actualizados, mostrando las ramas recorridas desde el nodo origen del árbol global hasta los dos subárboles, mostrando con detalle ciertas ramas del subárbol con nodo raíz `tqssrrrtqsqrqrtrt`. No se muestran más ramas ni otros detalles para no añadir complejidad a la figura.

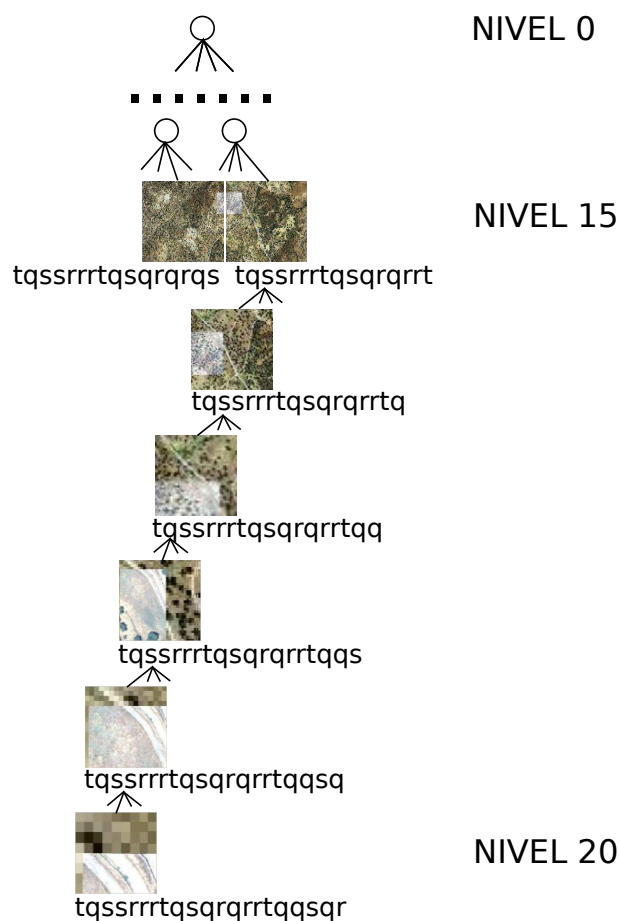


Figura 4.15: Árbol jerárquico global actualizado a partir de una nueva ortofoto

La figura 4.16 muestra las dos teselas del nivel 15 una vez actualizadas.

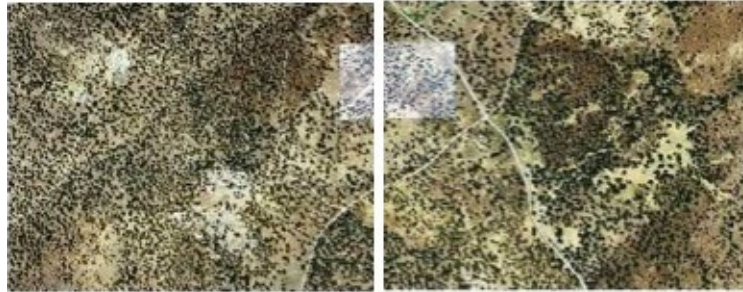


Figura 4.16: Teselas tqssrrrtqsqrqrs (izquierda) y tqssrrrtqsqrqrt (derecha) actualizadas

El algoritmo que hemos propuesto actualiza parcialmente la jerarquía, actuando sobre aquellas ramas y niveles más característicos, ya que actualizar todos los niveles de las ramas implicadas requeriría una gran inversión de tiempo, además de cargar considerablemente al sistema. Esta metodología también ha sido adoptada por otros autores (García Martín et al. 2013, Kefaloukos et al. 2012), que sostienen que actualizar parcialmente es la opción más indicada, especialmente cuando la renovación de ortofotos es frecuente.

La propuesta que realizamos es compatible con las soluciones sugeridas por otros autores, como la propuesta por Zhang and You (2010), que genera la jerarquía al solicitar regiones concretas, o Kefaloukos et al. (2012), que en función de las teselas más demandadas, se anticipa a futuras peticiones y genera los niveles y ramas con mayor probabilidad de ser accedidos en los intervalos de tiempo en los que el sistema presente menor carga de trabajo; en ambos casos, la generación de la jerarquía se puede llevar a cabo con nuestra propuesta. La generación parcial del árbol está justificada en casos de jerarquías de numerosos niveles en los que no es eficiente ni necesario generar la jerarquía completa.

Existen otras aplicaciones en la que es necesario llevar a cabo tareas de procesamiento en un área determinada, lo cual supone un uso intensivo de recursos mediante técnicas tradicionales; una alternativa más eficiente es emplear sistemas de procesamiento paralelo (Wallis et al. 2009), siendo necesario descomponer la tarea principal en múltiples subtareas que actúan sobre áreas diferentes, procedimiento que se ve facilitado al representar la información mediante un árbol generado con el algoritmo que hemos propuesto.

4.1.2. Estudio estadístico de la exactitud posicional

Para cada uno de las 588 puntos geodésicos levantados topográficamente, se llevó a cabo un estudio de la exactitud posicional, simplificando y normalizando los resultados mediante distribuciones normales de las funciones Et, Ex, Ey (Castillo-Carrion et al. 2012). Para ello, en primer lugar se calculó el valor de las siguientes variables:

- Mínimo: Valor mínimo de la muestra, en metros.
- Máximo: Valor máximo de la muestra, en metros.
- Rango: Intervalo de menor tamaño que contiene los datos de la muestra, en metros.
- N: Número de datos de la muestra.
- N_Sturges: División de la muestra en intervalos aplicando la regla de Sturges, $1 + \log_2 N \approx 10$
- Amplitud: Redondeo con dos decimales de la división entre el rango y el número de intervalos.

El resultado del análisis estadístico se muestra en la tabla 4.1, las unidades están expresadas en metros; la tabla 4.2 muestra otras variables estadísticas complementarias.

Tabla 4.1: Variables estadísticas para el estudio de la exactitud posicional del árbol jerárquico generado.

Función	Ex	Ey	Et
Mínimo	-2.6201	-4.5524	0
Máximo	3.5802	4.1636	6.7834039
Rango	6.2003	8.716	6.7834039
N	588	588	588

Tabla 4.2: Variables estadísticas complementarias expresadas en metros

Función	Ex	Ey	Et
N_Sturges	10	10	10
Amplitud	0.63	0.88	0.68
N_Sturges · Amplitud	6.3	8.8	6.8
N_Sturges · Amplitud-rango	0.0997	0.084	0.0165961
(N_Sturges · Amplitud-rango)/2	0.04985	0.042	0.0082981

Ex, Ey y Et poseen una amplitud de 0.63, 0.88 y 0.68, respectivamente. $N_Sturges \cdot Amplitud$ muestra el nuevo rango de valores de cada intervalo, que excede en 0.0997, 0.084 y 0.0165961 el rango de valores original de Ex, Ey, Et, respectivamente, por lo que el valor mínimo y máximo se debe incrementar y decrementar por la mitad de tal cantidad en cada función, es decir, 0.04985, 0.042 y 0.0082981 respectivamente. A partir de las variables calculadas, se obtiene para cada intervalo:

- Extremo inferior: Extremo inferior del intervalo.
- Extremo superior: Extremo superior del intervalo.
- Media: Punto medio de cada uno de los intervalos.
- Frecuencia: Número de datos que pertenece al intervalo, es decir, número de puntos geodésicas cuya exactitud posicional está dentro del intervalo.

Cuyo resultado para Et, Ex, Ey se presentan en las tablas 4.3, 4.4, 4.5. Los valores se expresan en metros.

Tabla 4.3: Ex(m) para cada intervalo

Extremo Inferior	Extremo Superior	Media	Frecuencia
-2.67	-2.04	-2.355	18
-2.04	-1.41	-1.725	28
-1.41	-0.78	-1.095	50
-0.78	-0.15	-0.465	89
-0.15	0.48	0.165	122
0.48	1.11	0.795	122
1.11	1.74	1.425	70
1.74	2.37	2.055	53
2.37	3	2.685	22
3	3.63	3.315	14

Tabla 4.4: $E_y(m)$ para cada intervalo

Extremo Inferior	Extremo Superior	Media	Frecuencia
-4.6	-3.72	-4.16	13
-3.72	-2.84	-3.28	19
-2.84	-1.96	-2.4	36
-1.96	-1.08	-1.52	68
-1.08	-0.2	-0.64	106
-0.2	0.68	0.24	190
0.68	1.56	1.12	95
1.56	2.44	2	50
2.44	3.32	2.88	16
3.32	4.2	3.76	11

Tabla 4.5: $E_t(m)$ para cada intervalo

Extremo Inferior	Extremo Superior	Media	Frecuencia
-0.01	0.67	0.33	78
0.67	1.35	1.01	155
1.35	2.03	1.69	151
2.03	2.71	2.37	85
2.71	3.39	3.05	45
3.39	4.07	3.73	35
4.07	4.75	4.41	17
4.75	5.43	5.09	15
5.43	6.11	5.77	13
6.11	6.79	6.45	6

A partir de las tablas 4.3, 4.4, 4.5, y con objeto de estudiar la distribución normal de las muestras, se calcula la media y desviación estándar, como se puede apreciar en la tabla 4.6.

Tabla 4.6: Media y desviación estándar

	Ex	Ey	Et
Media	0.4215279	-0.057037	1.9313265
Desviación estándar	1.2453233	1.536878	0.0828783

Las figuras 4.17, 4.18, 4.19 muestran en diagrama de barras la frecuencia de las muestras para cada intervalo de E_x , E_y y E_t , respectivamente, y de forma superpuesta la tendencia según la distribución normal $Prob \cdot N$ asociada. El eje X representa el valor del error medio de cada intervalo, y el eje Y el número de puntos cuya exactitud posicional está dentro de ese intervalo.

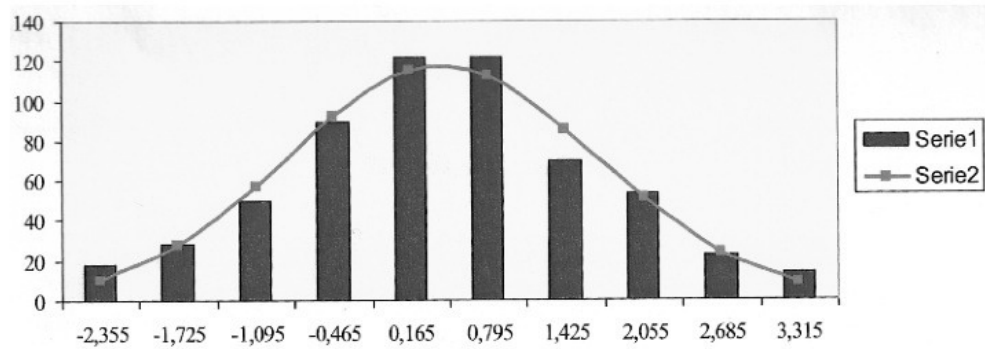


Figura 4.17: Exactitud posicional del árbol jerárquico generado. Diagrama de barras y distribución normal de E_x

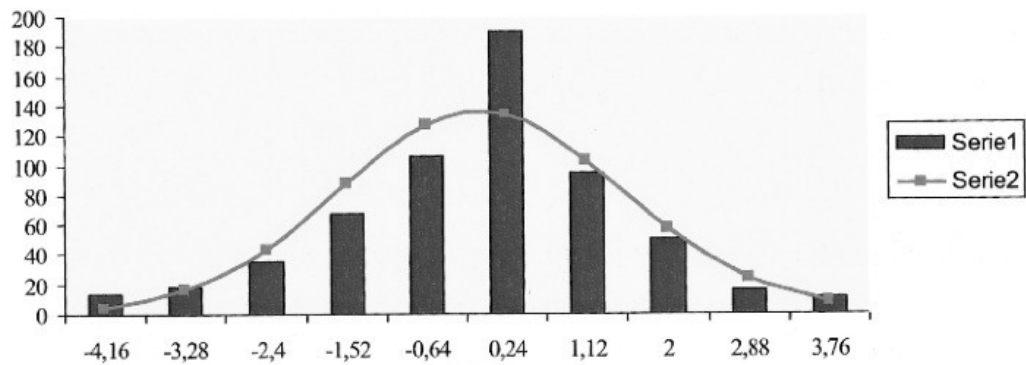


Figura 4.18: Exactitud posicional del árbol jerárquico generado. Diagrama de barras y distribución normal de E_y

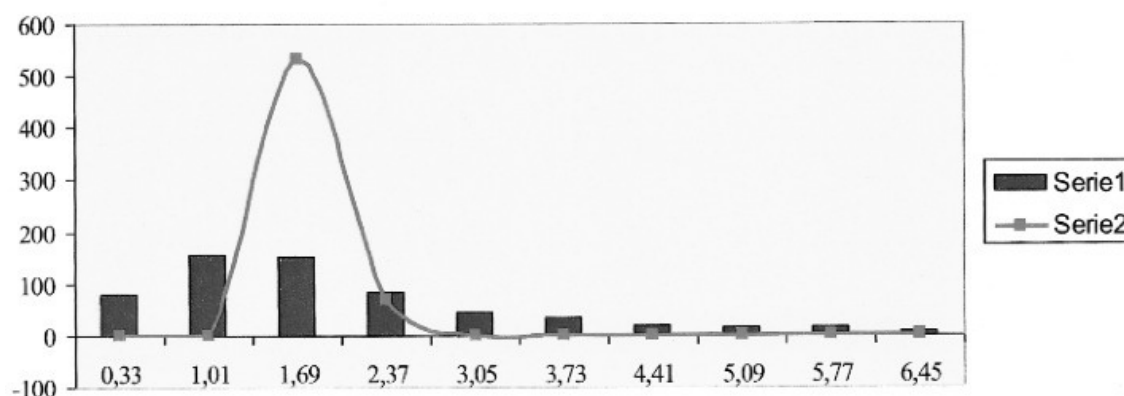


Figura 4.19: Exactitud posicional del árbol jerárquico generado. Diagrama de barras y distribución normal de RMSE

Ex y Ey presentan una media inferior a 0.5m con una desviación típica alrededor de 1.5m, Et presenta una media inferior a 2m con una desviación típica inferior a 0.1m.

Potere (2008) realiza un estudio de la calidad posicional de las imágenes de Google Earth. Para ello, hace uso de imágenes Landsat con exactitud posicional de 50m, e identifica y obtiene las coordenadas de 436 elementos bien definidos visualmente (cruce de carreteras, etc.) en imágenes Landsat y en imágenes Google Earth; posteriormente, compara las coordenadas de esos elementos en las imágenes de Google Earth con respecto a sus coordenadas en las imágenes Landsat, obteniendo un error de 39.7m, a lo que suma el error que de por sí poseen las propias imágenes Landsat, y obtiene una exactitud posicional con RMSE (error cuadrático medio) igual a 89.7m, no presentando la precisión adecuada para ciertas aplicaciones.

Otros autores como Chang et al. (2009) utilizan imágenes de Google Earth para crear un mosaico georeferenciado de un área de Nicaragua, aplicando una metodología que permite reducir el error posicional de 39.7m de Google Earth a 5-6m. Para ello, descargan imágenes no georeferenciadas de Google Earth, disponen las imágenes de forma que entre ellas presenten una alineación adecuada, y crean un mosaico utilizando la función rectificar de Erdas; una vez creado el mosaico, identifican visualmente 4 puntos, obtienen sus coordenadas con un dispositivo GPS que presenta un error de 5-6m, y llevan a cabo una georeferenciación del mosaico; no obstante, ello implica desplazarse a los diferentes puntos y anotar sus coordenadas manualmente, sin embargo, el algoritmo que proponemos nosotros ha generado una jerarquía de teselas compatible con Google Maps con un error posicional significativamente inferior de forma automática.

4.2. Tratamiento de imágenes procedentes de UAVs y optimización de los procedimientos de generación automática de imágenes con métrica

4.2.1. Configuración del sensor y métodos de captura

Hemos ensayado diferentes métodos de adquisición de imágenes empleando la cámara GoPro YHDC5170. Un primer método ha sido grabar video durante el vuelo, para posteriormente extraer fotogramas de ese video; sin embargo, los fotogramas no poseen calidad adecuada, y no agregan etiquetas de metadatos, necesarios para poder utilizar parte de las herramientas y algoritmos descritos en esta tesis. Otro método que hemos probado ha sido capturar imágenes de forma continua, con una pausa entre captura y captura; hemos comprobado que esta opción permite agregar etiquetas, y que el intervalo de pausa entre adquisición y adquisición no afecta a la calidad del resultado, por lo que para obtener la mayor cantidad de imágenes posibles, hemos decidido definir el intervalo de adquisición con el valor mínimo posible de dos segundos. Esta metodología coincide con la propuesta por Neitzel and Klonowski (2011), que propone un sistema UAV con una cámara Canon IXUS 110 IS que adquiere imágenes de forma continua.

Se han realizado diferentes vuelos controlando manualmente el UAV, modificando la altura para generar imágenes con diferentes niveles de escala, y realizando giros y modificaciones de la orientación, con objeto de tener imágenes de una escena tomada desde distintos puntos de vista. Hemos adquirido un total de 500 imágenes, a las que les hemos aplicado un tratamiento que se explica en apartados posteriores.

4.2.2. Conexión inalámbrica UAV-GCS

Hemos realizado vuelos configurando conexiones inalámbricas con velocidades de transmisión de 56kbps y 9.6kbps; teóricamente, una velocidad de transmisión menor supone mayor alcance, pero también mayor latencia. En los ensayos realizados, la máxima distancia a recorrer es inferior a 3km; hemos comprobado que ambas configuraciones permiten alcanzar esta distancia, pero la latencia introducida por la conexión de 9.6kbps es muy elevada, por lo que hemos optado por la configuración de 56kbps.

4.2.3. Establecimiento de correspondencias entre el fichero de telemetría y las imágenes aéreas

El dispositivo APM, a través del enlace inalámbrico GCS-UAV, almacena en el GCS un fichero que registra, entre otras variables, los datos de navegación, ofreciendo la posibilidad de asignar una georeferenciación aproximada a las imágenes; para alcanzar una precisión adecuada ha sido necesario desarrollar un algoritmo cuyo digrama de flujo se muestra en la figura 4.20, con una primera fase que se implementa mediante shell scripts que se ejecutan en Ubuntu 12.04; y una segunda y tercera fase que se implementa mediante perl e igualmente se ejecutan en Ubuntu 12.04.

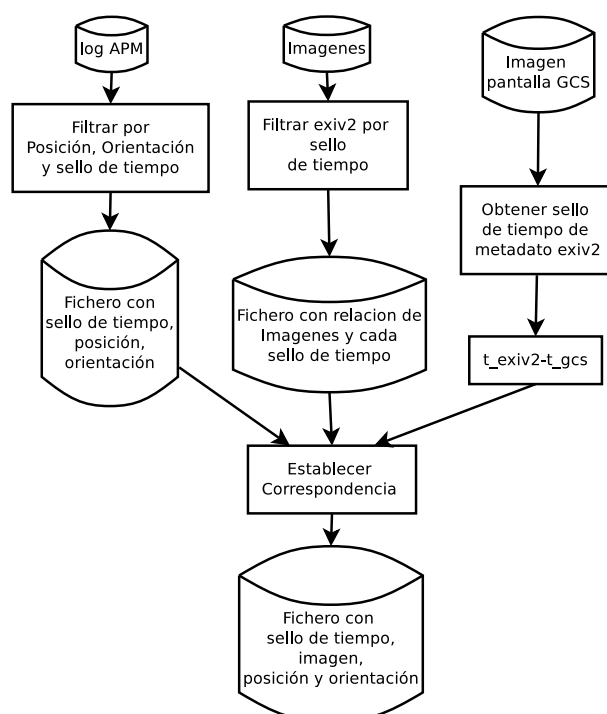


Figura 4.20: Correspondencia entre la telemetría del UAV y las imágenes

La primera fase realiza una lectura de los metadatos de las imágenes accediendo a la información exiv2¹, y realiza un filtrado para identificar en qué instante se adquiere cada una; se genera un fichero *F1* con la información resultante.

La segunda fase toma el fichero de telemetría, y filtra su contenido para mostrar, en cada instante, los datos de navegación del UAV, y genera un

¹<http://www.exiv2.org>, accedido 10 Marzo 2014

fichero $F2$ con el resultado del filtrado.

La tercera fase toma los ficheros $F1$, $F2$, y un parámetro d que indica el desfase temporal que existe entre cada línea i del fichero $F1$ y su correspondiente línea j del fichero $F2$, algo similar a la “marca de evento” empleada por Sullivan and Brown (2002). Un procedimiento sencillo para obtener el valor d empíricamente es tomar una foto de la pantalla del GCS en la que se muestra el tiempo actual, de modo que la diferencia entre el tiempo mostrado en la imagen y el tiempo registrado en el metadato `exiv2` proporciona este valor.

Sullivan and Brown (2002) utilizan una sistemática similar. Emplean cámaras digitales, de mayores prestaciones que las que proponemos en esta tesis, que generan una señal de sincronismo la cual es enviada al receptor GPS; éste, a través de una “marca de evento”, registra la señal y la asocia a los datos de navegación, permitiendo conocer de forma exacta los datos de navegación de cada imagen.

4.2.4. Extracción de regiones de interés de una ortofoto

Del conjunto de imágenes aéreas I capturadas por el UAV, a priori seleccionamos aleatoriamente 25 imágenes img_i , que cumplen el criterio establecido en la tabla 3.2. Como primera aproximación al proceso de optimización, se correlaciona cada $img_i \in I$, $i \leq 25$, con la ortofoto O de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, cuyas especificaciones hemos descrito en la tabla 3.2; no obstante, hemos constatado que la extensión geográfica de la ortofoto O es mucho mayor que la que presenta cada imagen img_i , de modo que O proporciona más información de la necesaria y añade complejidad al proceso. Con objeto de simplificar el proceso, hemos optado por diseñar e implementar un algoritmo que, para cada img_i , extrae una región O_i de la ortofoto O con una cobertura geográfica similar a img_i , cuyo diagrama de flujo se aprecia en la figura 4.21; como resultado de aplicar este algoritmo se han obtenido 25 regiones $O_i \subset O$ cuyas especificaciones se muestran en la tabla 4.7.

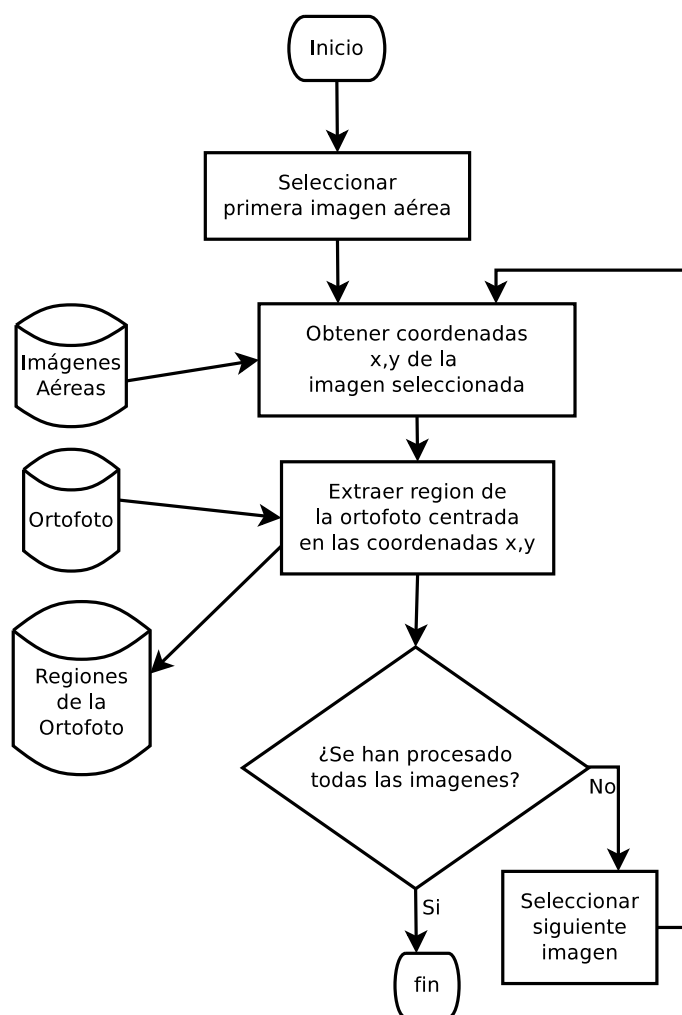


Figura 4.21: Diagrama de flujo del algoritmo de extracción de regiones de una ortofoto

Tabla 4.7: Especificaciones de cada región extraída de una ortofoto de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio

Especificaciones para cada región de la ortofoto	
Resolución	2.000px x 2.000px
Resolución de pixel	0.5m
Resolución espectral	3 (rojo, verde, azul)
Extensión	1.000m (vertical) x 1.000m (horizontal)

La parte superior de la figura 4.22 muestra tres imágenes aéreas del conjunto de 25 fotografías que cumplen los criterios establecidos, y la parte inferior las regiones extraídas de la ortofoto de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio para cada imagen; se puede apreciar cómo la lente de la cámara introduce una gran distorsión en la imagen, y la orientación de cada imagen difiere en gran medida respecto a las regiones extraídas.

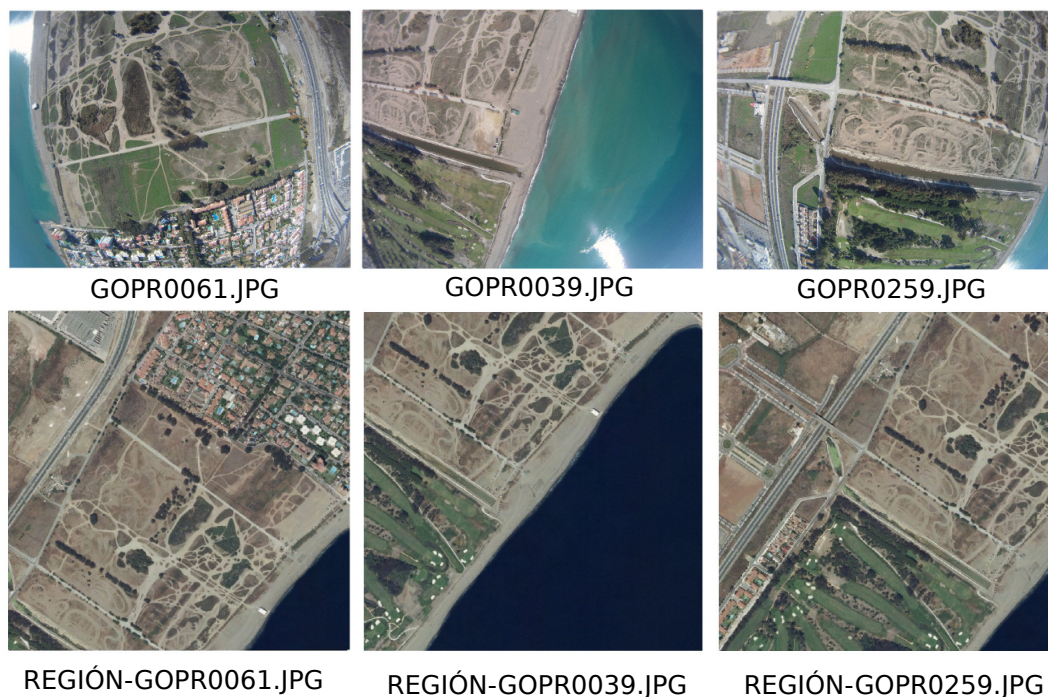


Figura 4.22: Tres imágenes aéreas tomadas con una cámara Gopro (parte superior), y sus correspondientes regiones (parte inferior) extraídas de una ortofoto de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.

4.2.5. Preparación del entorno software

Hemos seleccionado ImageJ como herramienta de correlación basada en SIFT, aunque también hemos explorado otras herramientas como: vlfeat ², opencv ³, OpenSIFT ⁴.

Tradicionalmente ImageJ se ha utilizado en el ámbito de la medicina, tratamiento de imágenes radiológicas, imágenes celulares, etc., pero sus características y sobretodo la comunidad de desarrolladores y usuarios, nos han

²www.vlfeat.org, accedido 20 Abril 2014

³opencv.org, accedido 20 Abril 2014

⁴<http://robwhess.github.io/opensift/>, accedido 20 Abril 2014

decidido a seleccionar ImageJ. A través del complemento *Feature Extraction - Extract SIFT Correspondences* de ImageJ, hemos identificado puntos característicos en pares de imágenes aplicando el algoritmo SIFT, y hemos filtrado los resultados con RANSAC, proporcionando en nuestro caso una solución operativa que permite modificar y optimizar los parámetros, y guardar los resultados fácilmente, todo ello sin necesidad de desarrollar código alguno, constituyendo ésto su principal atractivo frente a otras herramientas y librerías que sí requieren un desarrollo de código más amplio.

Por ello, hemos utilizado ImageJ para correlacionar cada imagen aérea con sus correspondiente región extraída de la ortofoto, y hemos desarrollado una macro para automatizar y ejecutar esta correlación con cada una de las 25 imágenes, cuyo diagrama de flujo se muestra en la figura 4.23.

Instalar ImageJ y los plugins necesarios no es una operación trivial, ya que es necesario resolver dependencias, instalar plugins, etc. Fiji⁵ es una distribución de ImageJ que incluye la aplicación, el motor de ejecución de Java, documentación, y un conjunto de plugins, con el objetivo de facilitar el uso e instalación de la aplicación por parte del usuario; se actualiza automáticamente, incluye documentación, tutoriales, y ofrece un repositorio de código fuente con control de versiones a los desarrolladores. Permite añadir funcionalidad mediante scripts en Javascript, Jython, JRuby, Clojure, BeanShell. Los sistemas operativos en los que se ha instalado y ejecutado esta aplicación han sido Ubuntu 12.04 LTS, Ubuntu 12.10 LTS, MacOSX 10.7.5.

⁵<http://fiji.sc/Fiji>, accedido 24 Diciembre 2013

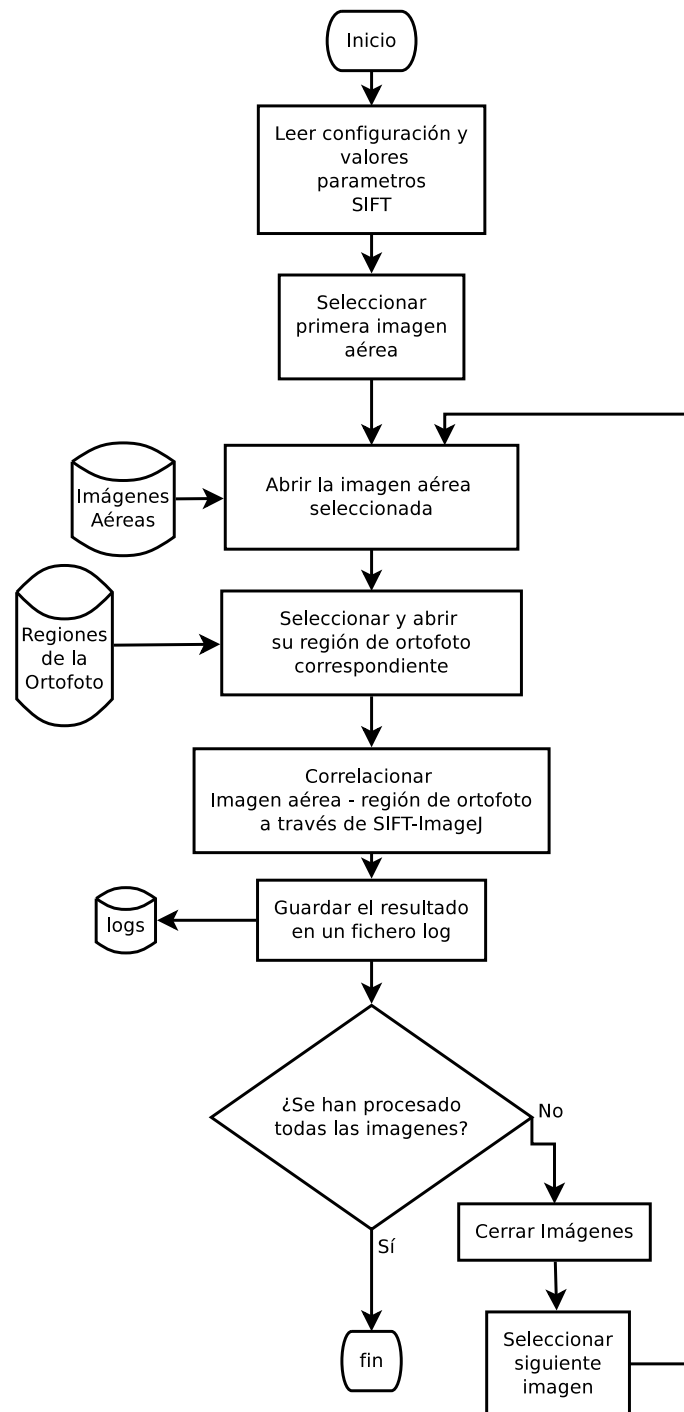


Figura 4.23: Diagrama de flujo de una macro implementada en ImageJ para correlacionar múltiples imágenes

4.2.6. Optimización de parámetros

Se ha llevado a cabo una optimización del algoritmo SIFT asignando diferentes valores a sus parámetros, estudiando la eficiencia del algoritmo a través del número de puntos detectados (SM), y el porcentaje de puntos correctamente detectados (CMR).

Considerando las recomendaciones de Sima and Buckley (2013) y May et al. (2010), se han estudiado diferentes niveles de los parámetros más significativos en imágenes aéreas, sigma y nScales; el parámetro *umbral de contraste* ha sido ampliamente investigado por algunos autores (Lingua et al. 2009b, Cesetti et al. 2010), por lo que obviamos su estudio. De forma similar, tampoco hemos profundizado en la influencia que ejerce el número de octavas sobre la eficiencia del procedimiento, tomando los valores por defecto de ImageJ de 1024px y 64px como resolución máxima y mínima, respectivamente, ya que los puntos que se detectan en estas octavas se corresponden con las estructuras de mayor tamaño, más robustos y estables frente a cambios geométricos y cambios del paisaje debido al transcurso del tiempo. Tras este razonamiento, los parámetros que hemos decidido optimizar son sigma y nScales.

Hemos comprobado que la asignación inicial de restricciones en el resto de parámetros condiciona notablemente los resultados y convergencia de la optimización, por lo que hemos realizado un estudio de las restricciones iniciales más adecuadas, correlacionando un reducido número de imágenes seleccionadas aleatoriamente. La tabla 4.8 muestra el resultado para diferentes valores de NNDR y FDS; podemos observar que la asignación NNDR=0.92 y FDS=8x8 proporciona los valores más elevados de SM y CMR, coincidiendo con la propuesta de Sima and Buckley (2013) e ImageJ.

Tabla 4.8: SM (normal) y CMR (cursiva) para diferentes valores de FDS y NNDR en el proceso de optimización de SIFT

FDS	NNDR	GOPR0039	GOPR0061	GOPR0198	GOPR0259
4x4	0.8	9 <i>88.89</i>	5 <i>100</i>	6 <i>100</i>	3 <i>66.67</i>
4x4	0.92	15 <i>86.67</i>	1 <i>0</i>	1 <i>0</i>	1 <i>0</i>
6x6	0.8	8 <i>75</i>	3 <i>100</i>	4 <i>100</i>	3 <i>100</i>
6x6	0.92	9 <i>66.67</i>	12 <i>100</i>	11 <i>100</i>	1 <i>0</i>
8x8	0.8	6 <i>83.33</i>	4 <i>75</i>	2 <i>50</i>	2 <i>50</i>
8x8	0.92	14 <i>85.71</i>	12 <i>91.67</i>	12 <i>100</i>	8 <i>62.5</i>
9x9	0.8	6 <i>66.67</i>	3 <i>100</i>	5 <i>100</i>	3 <i>66.67</i>
9x9	0.92	10 <i>40</i>	12 <i>83.33</i>	9 <i>100</i>	8 <i>75</i>

Otras restricciones a tener en cuenta son las establecidas en el filtrado RANSAC. Un aspecto importante es el grado de deformación que introduce

la lente, ya que en función de ésta podemos ser más o menos restrictivos. En nuestro caso, el grado de deformación es elevado, por lo que hemos empleado una tolerancia de 10 píxeles.

A continuación, tras haber establecido las restricciones, hemos optimizado sigma y nScales de forma conjunta modificando sus valores y correlacionando las 25 imágenes aéreas con las correspondientes regiones de la ortofoto, cuyos resultados se muestran en las figuras 4.24 y 4.25, en las que el eje X representa las 25 imágenes aéreas, y el eje Y representa SM en el caso de la figura 4.24, y CMR en el caso de la figura 4.25, cuyo valor máximo es 100 y valor mínimo 0; los mejores resultados se obtienen con nScales=9 y sigma=2.6, valores óptimos que podemos utilizar en el caso de imágenes muy diferentes y deformadas, presentando importantes diferencias con los valores propuestos por Lowe (2004).

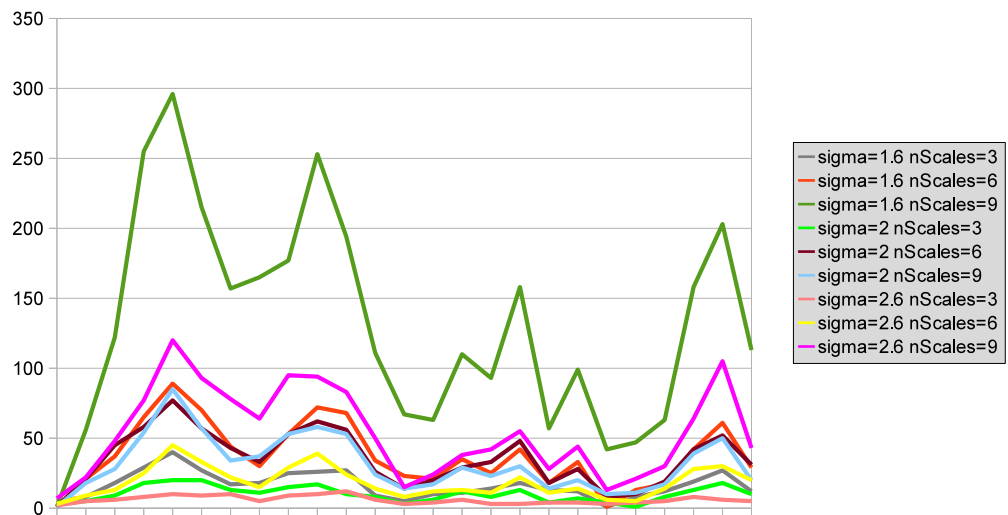


Figura 4.24: SM para diferentes valores de nScales y sigma asignados en el procedimiento de optimización de SIFT.

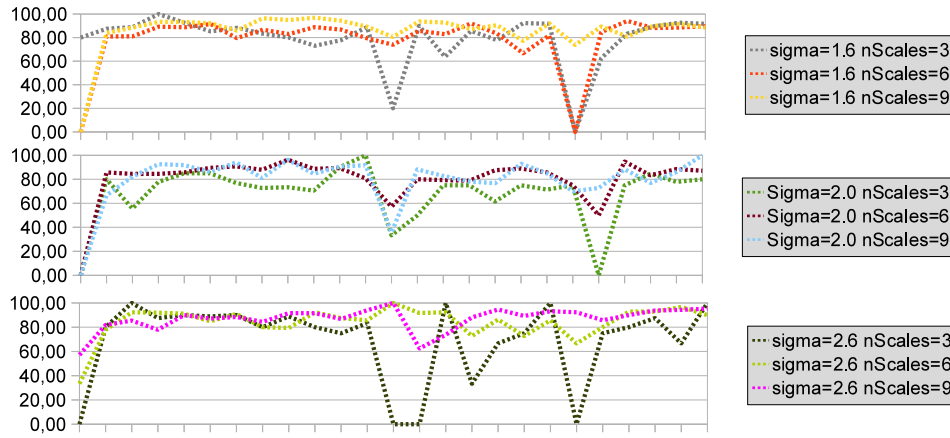


Figura 4.25: CMR para diferentes valores de $nScales$ y σ asignados en el procedimiento de optimización de SIFT.

Los resultados obtenidos por nosotros coinciden con los presentados por Lowe (2004); la figura 4.24 presenta que incrementar $nScales$ afecta a la repetibilidad de los puntos detectados, pero también hay que añadir que, el uso de imágenes con diferente orientación y escalado, unido a la fuerte distorsión creada por la lente en algunas áreas, ocasiona que los puntos detectados en la correlación entre imágenes aéreas y las regiones de las ortofotos no presenten siempre la misma localización ni el mismo número; también se observa que modificar los parámetros σ y $nScales$ produce un incremento/decremento proporcional de SM, por ello la forma de la gráfica es similar en todos los casos.

Incrementar el valor de σ decrementa el valor de SM, efecto observado por otros autores como Park et al. (2008), y que debemos evitar por razones que se ponen de manifiesto en el apartado 4.3. Para reducir este efecto, podemos disminuir σ , haciendo que el algoritmo actúe sobre niveles de mayor detalle, opción poco adecuada por la naturaleza de multitemporalidad de la imágenes; otra opción más conveniente es seguir las indicaciones de Lowe (2004) e incrementar $nScales$, ocasionando un incremento de SM, sin llegar a $nScales > 10$ tal como Fiji aconseja; sin embargo, Lowe (2004) advierte que incrementar $nScales$ ocasiona un decremento de CMR, pero en nuestro caso lo hemos evitado aplicando un filtro RANSAC, al igual que Wagner et al. (2008). Asignar $\sigma > 2,6$ implicaría $nScales > 10$ para obtener un valor SM adecuado, por lo que no hemos probado valores mayores. Hemos comprobado que valores de σ inferiores a 1.6 tampoco logran una mejor optimización.

En la figura 4.26 se muestra un ejemplo de correlaciones, tras aplicar la propuesta de optimización detallada anteriormente, entre la imagen aérea GOPR0061 (izquierda) y su región correspondiente de la ortofoto de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (derecha), cuyas especificaciones se muestran en la tabla 3.2. Presenta 46 correlaciones con un CMR de 95.35 %.

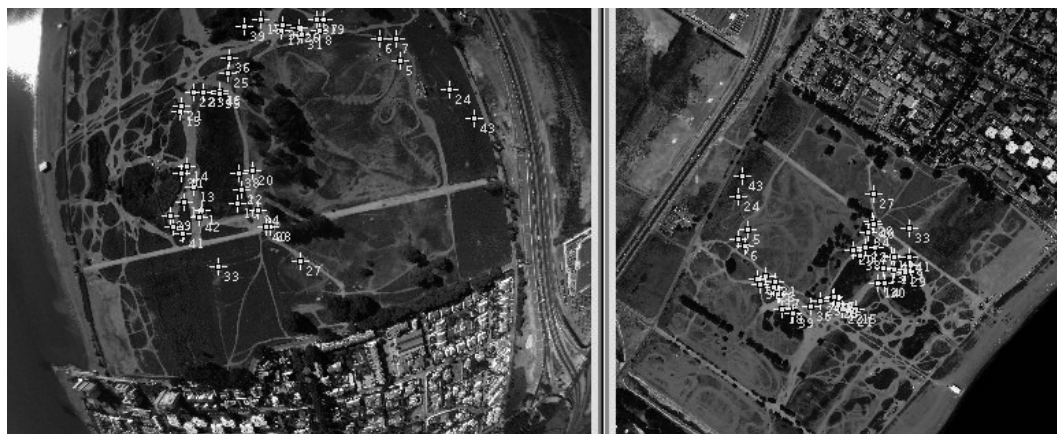


Figura 4.26: Correlaciones entre los puntos clave de la imagen aérea GOPR0061 y su región correspondiente en una ortofoto de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.

4.2.7. Estudio estadístico aplicado a la optimización de parámetros

La tabla 4.9 muestra el resultado de un análisis de varianza que hemos realizado, utilizando como factores sigma y nScale, y CMR como variable dependiente; podemos decir que el factor nScale influye significativamente en la variable CMR no influyendo significativamente sigma ni *sigma x nScales*.

Tabla 4.9: Análisis de varianza de la variable dependiente CMR frente a los factores sigma y nScales en el procedimiento de optimización de SIFT

Source	Type III Sum of squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected model	8770.331 ^a	8	1096.291	2.307	.022
Intercept	1399421.18	1	1399421.18	2945.418	.000
sigma	1019.329	2	509.665	1.073	.344
nScales	5806.261	2	2903.131	6.110	.003
sigma*nScales	1944.740	4	486.185	1.023	.396
Error	102625.499	216	475.118		
Total	1510817.01	225			
Corrected Total	111395.830	224			

a. R Squared = ,079 (Adjusted R Squared = ,045)

Hemos realizado un estudio estadístico para comprobar si las medias de sigma y nScales son diferentes, cuyos resultados se pueden apreciar en la tabla 4.10. De este estudio hemos deducido que las medias son diferentes en el caso de nScales=3 con respecto a nScales=6 y nScales=9; sin embargo, las diferencias de media entre 6 y 9 no son estadísticamente significativas. Corroboramos por tanto parte de las conclusiones de Sima and Buckley (2013) y May et al. (2010), ya que hemos comprobado que nScales es un parámetro significativo, aunque no podemos afirmar lo mismo de sigma. Según este estudio estadístico, asignar un valor u otro a sigma no influiría en el resultado, al igual que asignar 6 ó 9 a nScales; no obstante, recomendamos sigma=2.6, favoreciendo que el algoritmo se centre en aquellos elementos con más posibilidades de no verse alterados por la variedad de resolución temporal en los conjuntos de imágenes, y nScales=9 para incrementar el número de puntos detectados, aspecto clave que se comenta en apartados posteriores.

Tabla 4.10: Test de medias de la variable dependiente CMR respecto a sigma y nScales en el procedimiento de optimización de SIFT. Intervalo de confianza al 95 %

sigma	Media	nScales	Media
1.6	80.66a	3	71.93a
2	75.88a	6	80.72b
2.6	80.06a	9	83.95b

La tabla 4.11 muestra la media y la desviación estándar tras aplicar SIFT sobre el conjunto de validación con $\sigma=2.6$ y $nScales=6,9$, verificando que $\sigma=2.6$ and $nScales=9$ son los valores óptimos.

Tabla 4.11: Media y desviación estándar del conjunto de validación

Sigma	nScales	Media	Desviación estándar
2.6	6	86.10a	4.02
2.6	9	93.20b	3.61

4.3. Contraste de la optimización de los procedimientos de generación automática de imágenes con métrica

La propuesta de optimización del proceso de generación automática de imágenes con métrica, realizada en el caso de imágenes obtenidas con la plataforma Skywalker (cuyas especificaciones se pueden observar en la tabla 3.1), una cámara GoPro que producía una alta deformación geométrica, y unas condiciones particulares en cuanto al número y tipo de puntos de referencia, y a pesar de la robustez del modelo obtenido y de la precisión de los resultados, era conveniente contrastar la operatividad y precisión en condiciones muy diferentes, por lo que se ha contrastado el procedimiento en otra zona de estudio, con plataforma Skywalker X8 y sensor Canon IXUS 220HS, cuyas especificaciones se muestran en las tablas 3.6 y 3.7, respectivamente.

4.3.1. Configuración del sensor

Por las mismas razones que hemos descrito en el apartado 4.2.1, hemos empleado una sistemática de captura constante de imágenes de forma autónoma. En este caso, se ha utilizado una cámara Canon IXUS 220HS, cuyas especificaciones se muestran en la tabla 3.7; sin embargo, esta cámara no soporta esta funcionalidad de forma nativa en su firmware. Hemos localizado otro firmware más flexible denominado CHDK ⁶, compatible con nuestro sensor, y que permite agregar nuevas funcionalidades; hemos desarrollado un script que agregamos a la cámara, y cuyo diagrama de flujo se muestra en la figura 4.27.

⁶<http://chdk.wikia.com/wiki/CHDK>, accedido 14 Marzo 2014

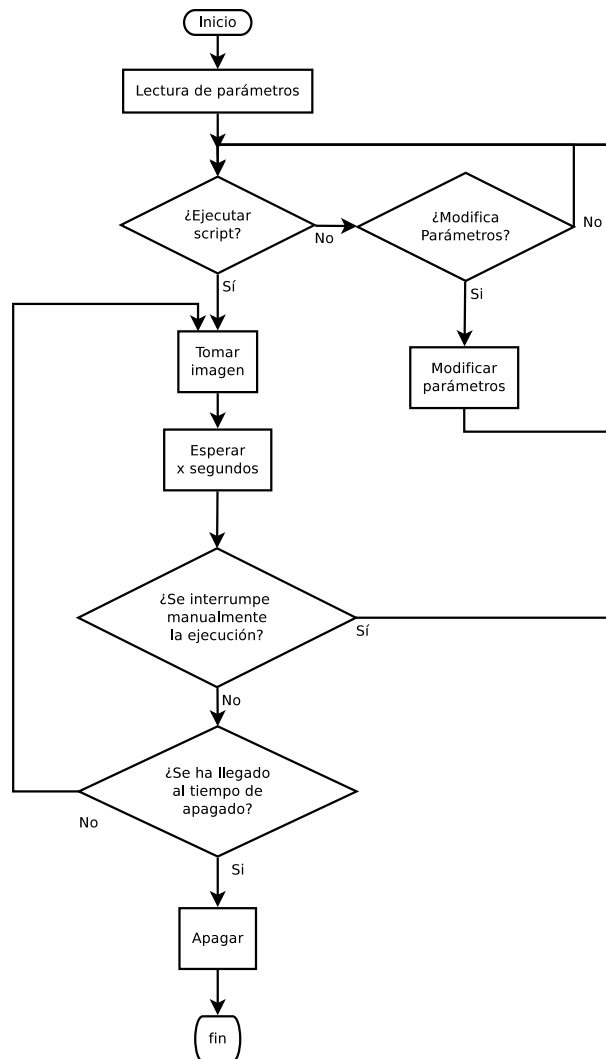


Figura 4.27: Algoritmo de adquisición de imágenes para cámara Canon con firmware CHDK.

Este script permite tomar imágenes de forma continua, definiendo el intervalo de pausa entre imagen e imagen, y transcurrido un tiempo especificado, el objetivo se oculta y el sensor se apaga, quedando éste protegido frente a posibles vibraciones durante el aterrizaje, lo que supone una mejora sustancial frente a la sistemática descrita en el apartado 4.2.1; con objeto de capturar el mayor número de imágenes posibles, después de un proceso de optimización se ha programado un intervalo de 3 segundos, tiempo mínimo de espera entre adquisición y adquisición; la sistemática descrita coincide con la propuesta por Toeppen and Sykes (2009) para capturar imágenes, en la que

el autor utiliza el mismo firmware que nosotros, agregando una funcionalidad similar. Se han seguido las recomendaciones de DeChant and Kinney (2012), que señalan que los fabricantes de cámaras con distancia focal variable no proporcionan con suficiente precisión los valores de las distancias focales intermedias, por lo que se ha seleccionado la distancia focal mínima de 4.3mm para obtener mayor recubrimiento transversal y longitudinal; la cámara se apaga transcurridos 45 minutos, u otro tiempo definido por el usuario.

Para disminuir el efecto de desenfoque al capturar imágenes desde la plataforma en movimiento, se ha reducido el tiempo de exposición a 1/2000 seg, con la consiguiente menor captación de luz, por lo que se ha desactivado el filtro ND para asegurar que el sensor reciba la máxima cantidad de luz posible. Wright et al. (2003) señalan que el espacio recorrido por la plataforma en el tiempo de adquisición no debe ser mayor que la mitad de la resolución; teniendo en cuenta que la velocidad media del UAV ha sido 23m/s, lo que supone un recorrido de 2cm en el tiempo de exposición (hemos redondeado al entero superior), se establece como requisito que la resolución de píxel no sea inferior a 4cm.

Una característica deseada en toda plataforma UAV con fines fotogramétricos similares a los propuestos en esta tesis, es la captura de imágenes cenitales; el firmware de la placa que utilizamos permite esta funcionalidad en sus versiones más modernas; sin embargo, nos hemos visto obligados a utilizar la versión 1.4, sin memoria suficiente para cargar estas versiones. Para resolver esta restricción hemos diseñado y construido un dispositivo constituido por dos servomotores que actúan sobre una placa de aluminio, sobre la que se sitúa la cámara, y hemos obtenido y modificado el código fuente de APM, implementando una versión simplificada del algoritmo que compensa los movimientos de cabeceo y giro del aeromodelo, leyendo los valores de los sensores inerciales de APM y actuando sobre los servomotores, con objeto de mantener la placa de aluminio paralela al horizonte; se puede observar un diagrama de flujo del algoritmo diseñado en la figura 4.28. A través de diferentes vuelos en los que hemos capturado imágenes, hemos comprobado que el sistema resultante es capaz de estabilizar el sistema de captura de forma similar a la versión oficial de APM empleada por otros autores (Sargeant 2012), y que puede ser utilizado en versiones más antiguas de la placa APM, opción no posible en caso de emplear el firmware oficial de APM.

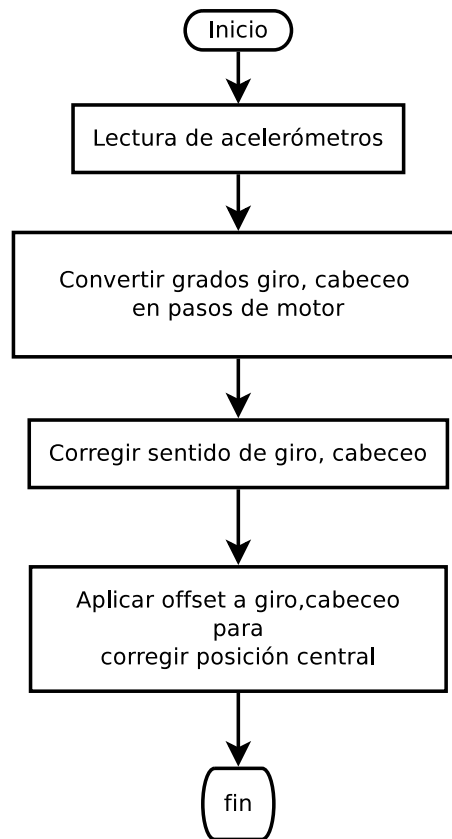


Figura 4.28: Diagrama de flujo del algoritmo que estabiliza el dispositivo de adquisición de imágenes

Aún habiendo diseñado e implementado esta solución para la estabilidad de la plataforma, consideramos que son numerosos los aspectos a tener cuenta para hacer operativa una plataforma de vuelo; en nuestro caso el empleo de un sistema que estabilice el dispositivo de captura hace necesario incorporar otros elementos auxiliares, que a su vez imponen ciertas restricciones a la plataforma, por lo que hemos decidido capturar imágenes prescindiendo del sistema estabilizador. Para ello, hemos alojado la cámara en el interior del UAV, practicando una abertura en la parte central inferior del fuselaje, por la que asoma el objetivo cuando éste no está oculto, se han añadido dos bloques de corcho de 5cm x 5cm en la inmediaciones exteriores de la abertura, a modo de protección, y se ha programado un apagado automático para ocultar el objetivo. Con esta configuración, hemos comprobado que el aterrizaje es menos complejo, la plataforma y el sensor no sufren desperfectos, y con un adecuado plan de vuelo, la plataforma realiza un vuelo estable y cenital en el que no es necesario el uso de autoestabilizador para captura

de imágenes, logrando una plataforma más sencilla, ligera y polivalente, lo cual contrasta con las soluciones de otros autores que incorporan sistemas estabilizadores, añadiendo complejidad en el aterrizaje y restricciones en el uso de la plataforma; por ejemplo, Hu et al. (2004) proponen el uso de tren de aterrizaje, elemento que hemos probado, pero restringe el uso del UAV a espacios amplios y despejados en los que exista una pista de aterrizaje asfaltada; otro variante propuesta por Hirokawa et al. (2007), Wyllie (2001) es el uso de paracaídas, pero presenta el inconveniente de no poder controlar en qué área aterrizará el UAV, situación especialmente agravada en presencia de viento.

4.3.2. Parámetros del vuelo

Para el desarrollo de las utilidades asociadas a las imágenes tomadas por la plataforma UAV, se estableció como meta recomendada una resolución de 12cm/píxel. Una resolución de 12cm/píxel requiere como máximo una altura relativa de 334m con respecto al terreno. El terreno presenta desniveles y la cota no es constante, el punto de mayor altura está a 757 metros, suponiendo una altura absoluta del UAV de 1091m, y el punto de menor altura 650 metros, suponiendo una altura absoluta del UAV de 984m.

Se propone mantener una altura constante de vuelo, ya que incrementar la altura absoluta de vuelo para mantener constante la altura relativa produce mayor consumo de energía (Bradley et al. 2007), además de añadir complejidad al sistema. Una altura absoluta de vuelo de 984m garantizaría una resolución mínima de 12 píxeles en cualquier área de la finca.

Considerando que los datos de navegación en mini-UAVs con APM de la gama para la que se están implementando estas prestaciones, ofrecen una precisión de 3m (Sevaldson 2012), que unido a la sensibilidad que presentan ante pequeños cambios meteorológicos (corrientes de aire térmico, rachas de viento, etc), hace difícil mantener con precisión una altura de vuelo (Schmale et al. 2008), teniendo lugar pequeñas fluctuaciones, que empíricamente se han estimado alrededor de 15m, todo ello nos llevó a proponer una altura absoluta de vuelo en 970m, asegurando así un tamaño de pixel $\leq 12cm$.

El lado transversal en el terreno oscila entre 305-459m. Una distancia de 150 metros entre cada par de pasadas supone doce pasadas con un recubrimiento transversal que oscila entre 50 %-67 %.

Las maniobras de aproximación se han realizado a 500m del inicio de la ruta, ya que hemos comprobado empíricamente que 500m son suficientes para que el UAV se estabilice en la ruta tras la maniobra; cuando el UAV se posiciona al inicio de la ruta, se encuentra alineado con ésta, apenas existen movimientos de alabeo y cabeceo, y prácticamente la totalidad de las

imágenes aéreas son cenitales.

No se definen centros de proyección en los que adquirir imágenes, la plataforma toma tantas imágenes como sea posible, ya que al ser el UAV un aeromodelo de ala fija y no un multirotor, resulta más complejo lograr que la imagen se adquiera en las coordenadas requeridas; posteriormente, se realiza un control de calidad en el que se descartan las imágenes no deseadas (fuera de ruta, orientación no deseada, imagen borrosa, etc). Esta estrategia coincide con la seguida por otros autores, como es el caso de Primicerio et al. (2012), que capturan tantas imágenes sea posible, para posteriormente seleccionar aquellas que resulten ser más adecuadas.

4.3.3. Ejecución del vuelo

Se ha optimizado y contrastado un procedimiento basado en una conexión inalámbrica APM-GCS, carga del plan de vuelo en la plataforma, y el sistema de comunicación inalámbrica basado en el protocolo MAVLINK ⁷, con licencia LGPL. El uso de estándares y protocolos abiertos da lugar a una plataforma interoperable y fácilmente integrable con otros sistemas, por lo que, tal como exponen Lim et al. (2012), un GCS que haga uso de este protocolo se puede comunicar con APM. Se han contrastado diversos sistemas, Qgroundcontrol ⁸ y Mission Planner, en términos de operatividad, complejidad, consumo de recursos, etc, y finalmente hemos seleccionado Mission Planner.

⁷<http://qgroundcontrol.org/mavlink/start>, accedido 16 Marzo 2014

⁸<http://qgroundcontrol.org/>, accedido 16 Marzo 2014

En la figura 4.29 se muestra la ruta de vuelo definida en Mission Planner. Se pueden observar 24 puntos de ruta, con 12 pasadas paralelas entre sí recorriendo la finca al completo; el UAV hace una pasada partiendo de un punto de ruta impar hacia un punto de ruta par, realiza una maniobra de aproximación a la siguiente pasada partiendo del punto de ruta par hacia el siguiente punto de ruta impar, y ejecuta la siguiente pasada partiendo del punto de ruta impar al siguiente punto de ruta par.

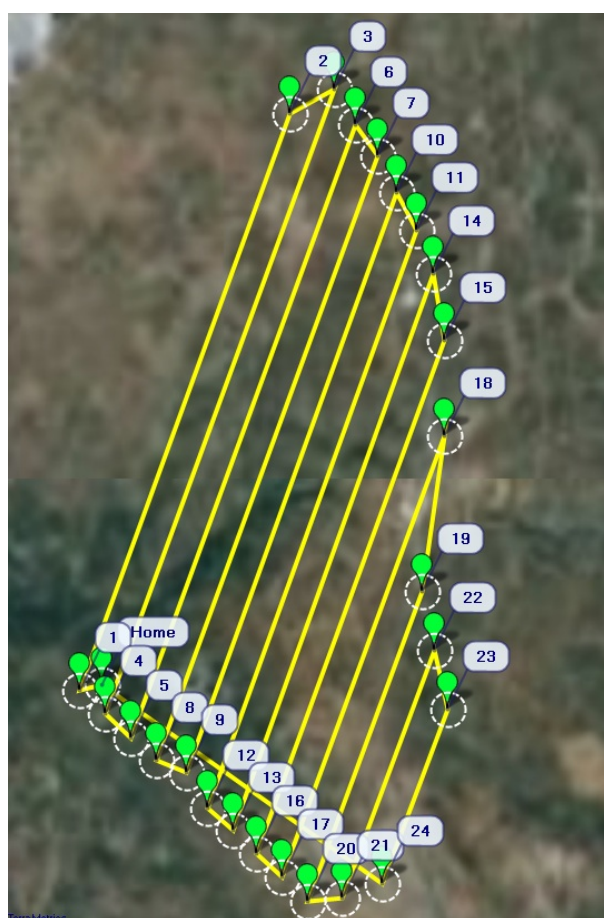


Figura 4.29: Definición de una ruta de vuelo en Mission Planner

La protocolización de la preparación del vuelo es un aspecto esencial; fruto de los numerosos ensayos que hemos realizado, proponemos 970m como altura de vuelo absoluta y definimos el plan de vuelo. Es crucial asegurar la integridad del UAV y la seguridad del vuelo, por lo que se procede a la comprobación del correcto funcionamiento de todos los dispositivos, por lo que se comprueba el nivel de batería, dispositivos de control (motor, servos, etc),

transmisiones inalámbricas (APM-GCS, emisora de radiocontrol, emisor de video), correcto funcionamiento del sensor, etc. Tras las comprobaciones, y con un control manual inicial del UAV por razones de seguridad, se procede a dar potencia al motor y se lanza el UAV con el brazo, sin necesidad de pista de despegue ni infraestructuras adicionales, lo cual es una muestra de la adaptabilidad de nuestra plataforma, como ya mencionábamos en la sección 4.3.1; una vez alcanzada altura suficiente (80m sobre el terreno aproximadamente), se cede el control del UAV a APM, que ejecuta la ruta de vuelo de forma autónoma. Cuando la ruta de vuelo se ha completado, el UAV regresa de forma autónoma al punto de lanzamiento y se aterriza con control visual desde la emisora.

Durante el vuelo, hemos verificado la importancia de disponer de una conexión inalámbrica GCS-APM que permite ajustar parámetros de control en tiempo real, además de otros mecanismos de control del UAV operando en diferentes frecuencias por seguridad: 868Mhz para el GCS, 434Mhz para la emisora de radiocontrol, 1.4Ghz para el emisor de video; en ciertas ocasiones, estando el UAV a 3Km de distancia, la presencia de obstáculos (una loma) interrumpía la emisión de video; el UAV dispone de un mecanismo de seguridad de vuelta al punto de lanzamiento, que se activa manualmente, o de forma automática ante pérdidas de conexión graves. No obstante, otros sistemas de conexión no se vieron interrumpidos, por lo que se pudo completar el plan de vuelo satisfactoriamente, corroborando lo expuesto por Dimc and Magister (2006), referente a que el uso de sistemas de control redundantes operando en diferentes frecuencias permiten no abortar el vuelo en caso de que uno de los sistemas no sea operativo.

Se adquirieron 564 imágenes y se georeferenciaron según el procedimiento descrito en el apartado 4.2.3, seleccionando 314 tras el control de calidad (puntos fuera de ruta, imágenes borrosas, etc), cuya distribución se aprecia en la figura 4.30.

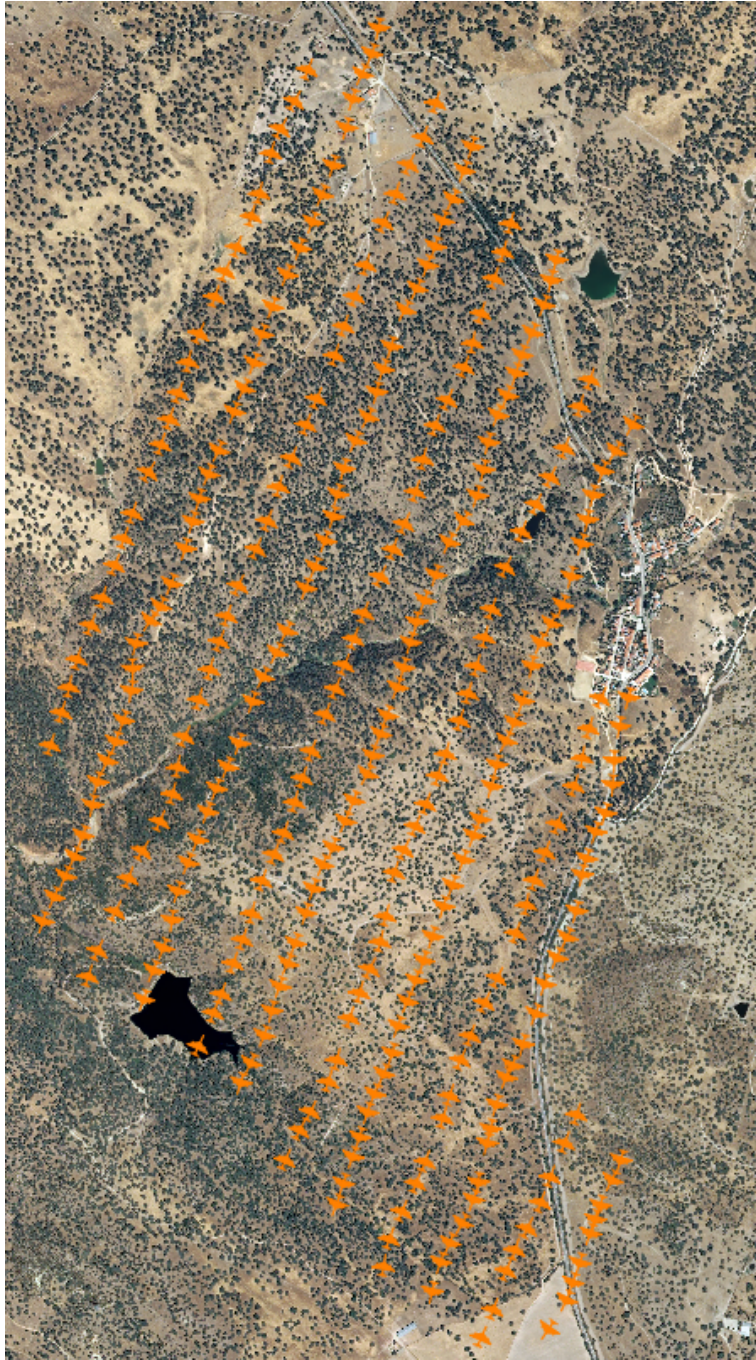


Figura 4.30: Rutas de la plataforma. Cada toma fotográfica y su orientación se representa con un icono de aeromodelo.

Analizando el fichero de telemetría se han verificado las hipótesis anteriores y las conclusiones de Schmale et al. (2008), la altura del UAV ha fluctuado

durante todo el vuelo entre los valores 918m-985m, frente a los 970m especificados en el plan de vuelo; la altura mínima presenta una fluctuación mayor, esto se debe a la presencia de viento especialmente racheado en los dos últimos tramos del vuelo, y al bajo nivel de la batería en ese tramo, por lo que la potencia del motor era menor. La altura relativa sobre el terreno presenta el valor mínimo 215m y máximo de 319m, dando lugar a un lado transversal sobre el terreno que oscila entre 308m-457m, con un recubrimiento transversal que oscila entre 51 %-67 %, dando lugar a una resolución espacial que oscila entre 8-11 cm/píxel.

La velocidad media de la plataforma ha sido 23m/s. El lado longitudinal del fotograma ha oscilado entre 227m-337m; con una velocidad de 23m/s, tomando fotos cada 3 segundos, la distancia que ha recorrido la plataforma entre foto y foto ha sido 69 metros, con un recubrimiento longitudinal que ha oscilado entre 69 %-79 %.

4.3.4. Validación del algoritmo *SIFT* optimizado

En el total de 314 imágenes válidas, se ha verificado el correcto funcionamiento del algoritmo SIFT optimizado. Se han seleccionado al azar 24 imágenes distribuidas de forma homogénea por la finca, su distribución se observa en la figura 4.31.

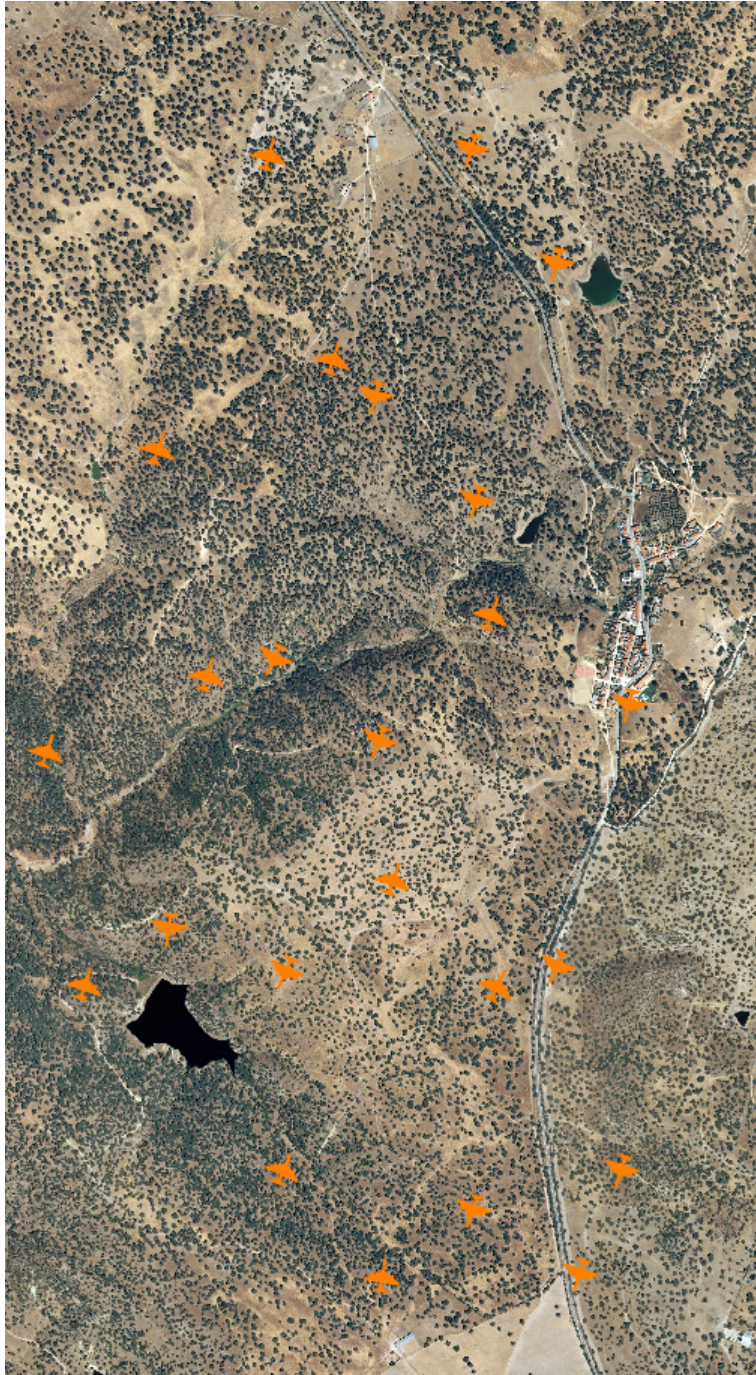


Figura 4.31: Selección de 24 imágenes aleatorias en la finca de Santa Clotilde.

Para cada una de las 24 imágenes aéreas, se ha aplicado el procedimiento propuesto en el apartado 4.2.4; se ha extraído de una ortofoto de la Consejería

de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, cuyas especificaciones se pueden observar en la tabla 3.3, una región centrada en las coordenadas de la imagen aérea, extensión similar, y orientación norte, cuyas especificaciones se muestran en la tabla 4.12

Tabla 4.12: Especificaciones técnicas de las regiones extraídas de la ortofoto especificada en la tabla 3.3

Resolución	688px x 680px
Resolución de pixel	0.5m/píxel
Resolución espectral	3 (rojo, verde, azul)
Extensión	344m (horizontal) x 340m (vertical)

Se ha aplicado el algoritmo SIFT con la propuesta de optimización descrita en el apartado 4.2. Debido al elevado número de SM que se ha obtenido, se ha tomado una muestra de 50 correlaciones aleatorias en cada imagen con respecto a su región correspondiente en la ortofoto existente y se ha estudiado el valor de CMR, tal como muestra la figura 4.32 (derecha).

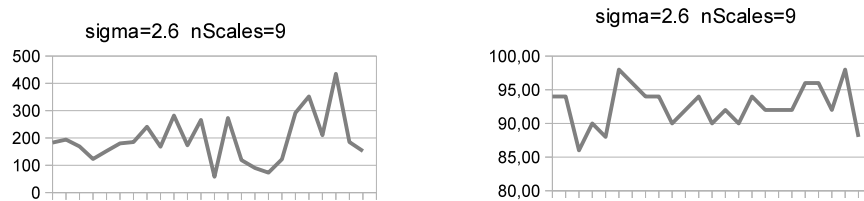


Figura 4.32: SM (izquierda), y CMR (derecha) sobre una muestra aleatoria de 50 correlaciones, aplicando RANSAC con error máximo de alineación=10 píxeles

El elevado valor de SM, y la menor deformación de la lente de la cámara con respecto a los ensayos realizados en la sección 4.2, permite volver a ejecutar el algoritmo sobre las 24 imágenes aéreas aplicando un filtro RANSAC con un valor más restrictivo del parámetro error máximo de alineación, de 10 píxeles, de la figura 4.32; se probaron diferentes valores, y el valor más restrictivo posible es 1.1 píxeles. La figura 4.33 muestra SM (izquierda) y CMR (derecha) para este valor. Al no ser SM tan elevado como el caso anterior, la muestra sobre la que se calcula CMR comprende todas las correlaciones detectadas.

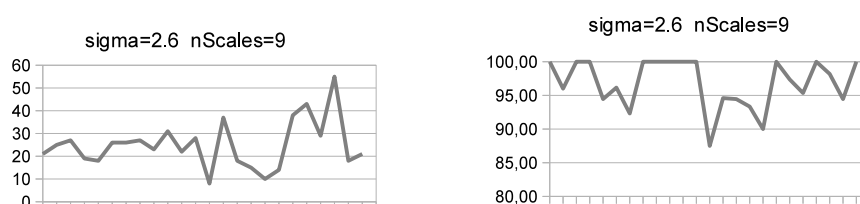


Figura 4.33: SM (izquierda) y CMR (derecha) utilizando RANSAC con error máximo de alineación=1.1 píxeles

En la tabla 4.13 se muestra la media y desviación típica de CMR en cada uno de estos casos; se deduce que reducir el máximo error de alineación optimiza los resultados.

Tabla 4.13: Media y desviación típica de CMR frente a diferentes errores de alineación

Máximo error alineación	Media	Desviación típica
10 píxeles	92.58	3.09
1.1 píxeles	96.84	3.64

4.3.5. Generación de ortofotografía asignando puntos de control automáticamente

Se ha diseñado e implementado un algoritmo que detecta de forma automática puntos de control y sus coordenadas geográficas. Consta de las siguientes fases:

4.3.5.1. Identificación de puntos correlativos entre imágenes aéreas y regiones de una ortofoto ya georeferenciada

Hemos identificado elementos diferenciables en cada imagen aérea, y hemos asignado a cada uno coordenadas geográficas utilizando la ortofoto georeferenciada cuyas especificaciones se muestran en la tabla 3.3; para asegurar la homogeneidad en la distribución de puntos hemos impuesto como restricción que todos los puntos están separados entre sí por una distancia mínima d_{gcp} . Para ello, hemos diseñado e implementado un algoritmo en perl, cuyo diagrama de flujo se muestra en la figura 4.34, que se basa en los procedimientos descritos a lo largo de la sección 4.2. La naturaleza del sensor utilizado en este caso, que introduce menor deformación que el sensor utilizado en la sección 4.2, nos ha permitido ser más restrictivos con la tolerancia del error al aplicar el filtro RANSAC, por lo que hemos asignado máximo error de alineación=1.1

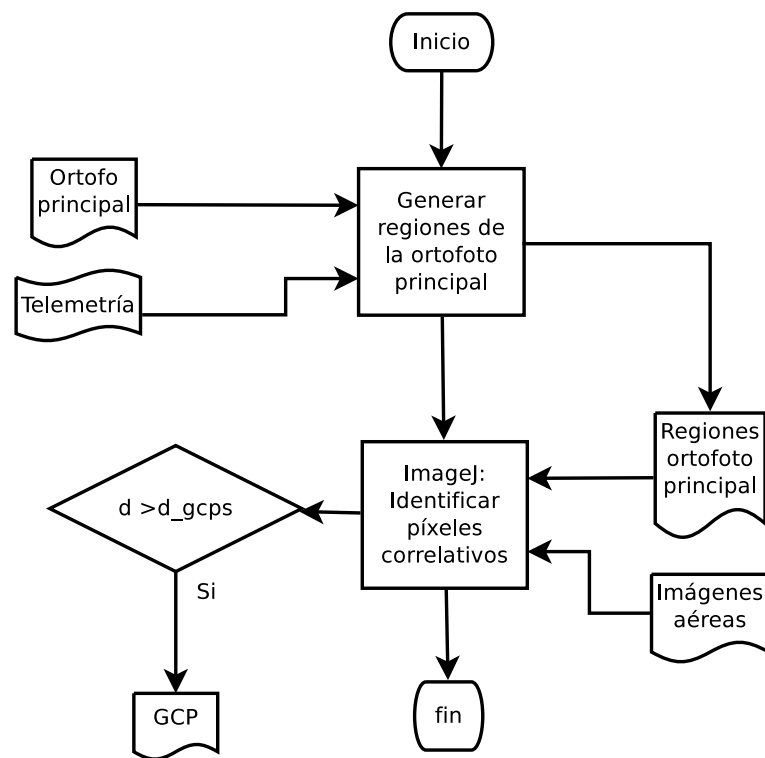


Figura 4.34: Extracción automática de puntos de control sobre el terreno

4.3.5.2. Correlación automática de puntos de control entre imágenes aéreas

A partir de

- una imagen aérea img_i ,
- gcp_i el conjunto de los puntos de control identificados en img_i según el algoritmo descrito en el apartado 4.3.5.1,
- $Pastis_{ij}$ el conjunto de puntos correlativos identificados entre las imágenes img_i , img_j a través del comando *Tapioca* de *MicMac*,

Se ha diseñado e implementado un algoritmo que $\forall(gcpX, gcpY, long, lat) \in gcp_i$, identifica $(px_iX, px_iY, px_jX, px_jY) \in Pastis_{ij}$ que minimiza la función $|g\vec{cp} - p\vec{x}_i|$; si el valor de la función es mayor que un umbral preestablecido $d_{max}gcp-px$ (valor por defecto 2), sitúa de forma automática el punto de control gcp_i en el píxel (px_jX, px_jY) de la imagen img_j , con coordenadas geográficas $(long, lat)$. Para la obtención del valor de Z, se propone utilizar el correspondiente al modelo digital obtenido a partir de los fotogramas utilizados para generar la correspondiente ortofoto de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.

Posteriormente, se han identificado aquellos puntos de control que cumplen $num(gcp_i) \geq min_img$, siendo min_img un parámetro que puede especificar el usuario, tomando 2 como valor por defecto, y $num(gcp_i)$ el número de imágenes en las que se ha detectado el punto de control gcp_i . Se genera de forma automática un fichero con información de estos puntos de control, en un formato compatible con el utilizado por el conjunto de utilidades *MicMac*. Esto permite incorporar este algoritmo al flujo de trabajo de *MicMac*, lo que nos ha permitido automatizar esta fase.

En la figura 4.35 se muestra un diagrama de flujo de funcionamiento del algoritmo.

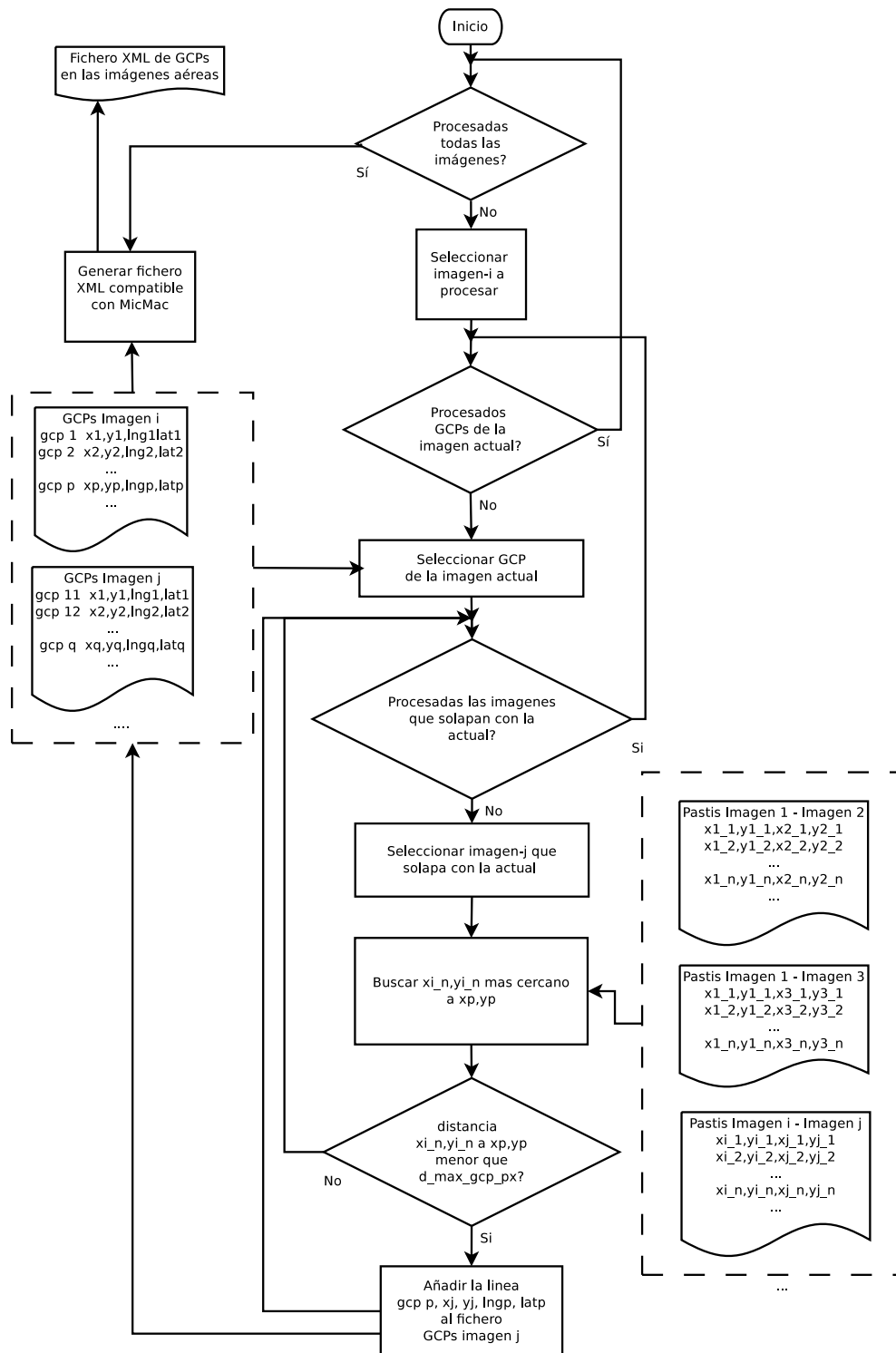


Figura 4.35: Correlación automática de puntos de control entre imágenes aéreas

Se han realizado 3 ensayos asignando diferentes valores a la variable *min_img*, y posteriormente se ha realizado un test de calidad posicional. Según Haralick et al. (1994), los puntos de control han de estar distribuidos homogéneamente; en el algoritmo que se ha desarrollado, *d_gcps* indica la distancia mínima que debe haber entre punto y punto, a través del cual se controla el grado de homogeneidad. Se ha comprobado que asignar *d_gcps*=0 detecta puntos de control distribuidos homogéneamente por el área de observación, siendo el número de puntos generados mayor al ser menos restrictivo este parámetro. Se ha asignado $d_{max}gcp-px = 2px$, implicando un error posicional $\leq 22cm$ sobre la ortofoto; asignar un valor mayor detectaría más puntos de control, pero el error posicional para cada punto de control sería mayor, y según Wan and Xu (1996) influye negativamente en la calidad posicional de la ortofoto final; asignar valores inferiores reduciría el error posicional para cada punto, no obstante, el número de puntos detectados disminuiría, afectando al resultado, tal como indican Fischler and Bolles (1981), Hung et al. (1985), Sutherland (1974).

Realizamos un estudio estadístico utilizando como factor *min_img*, y como variable dependiente los puntos de control detectados en cada imagen; deducimos que las medias son diferentes entre sí, y el factor *min_img* influye significativamente en el número de puntos de control detectados en cada imagen aérea. En la tabla 4.14 se puede observar la media de puntos de control por imagen y su desviación, además de una disminución drástica de los puntos de control en cada imagen al incrementar *min_img*. El número de puntos de control detectados en el mosaico final han sido 1.278, 495 y 146 para los valores 2, 3 y 4 de *min_img*, respectivamente.

Tabla 4.14: Puntos de control detectados automáticamente.

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
<i>min_img</i>	2	3	4
Media puntos control/img	10.42a	5.50b	2.36c
Desviación puntos control/img	6.08	4.13	2.03

Medias con letras diferentes son significativas con $p < 0,05$

4.3.6. Tests de calidad posicional

Se ha generado una ortofoto y un modelo digital del terreno para cada uno de los ensayos del apartado 4.3.5.2, y se ha comprobado su exactitud posicional a través de tests de calidad posicional NSSDA. De forma previa, se ha realizado una calibración de la cámara utilizando varias imágenes ad-

quiridas expresamente para ello; se ha utilizado el modelo *Fraser* por ser el modelo radial que posee más grados de libertad (12 grados) en MicMac ⁹.

Se ha tomado como fuente de referencia una ortofoto ya georeferenciada (especificaciones en la tabla 3.3), y dos modelos digitales del terreno, uno del IGN con paso de malla 5m (especificaciones en la tabla 3.5), y otro de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, con paso de malla 10m (especificaciones en la tabla 3.4). Se han identificado elementos distinguibles visualmente y de reducidas dimensiones, para que el test sea lo más exacto posible.

En la figura 4.36 se muestra la distribución de los puntos de la fuente de referencia.

⁹<http://logiciels.ign.fr/IMG/pdf/docmicmac.pdf>, accedido 22 Enero 2014

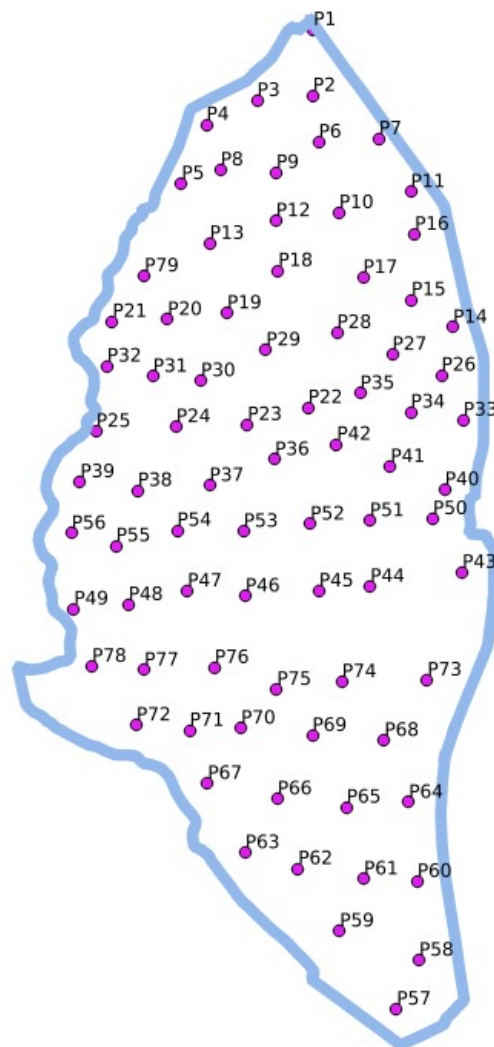


Figura 4.36: Distribución de puntos de mayor precisión.

La tabla 4.15 muestra la exactitud posicional horizontal al nivel del 95 % de confianza, y la exactitud posicional vertical al nivel del 95 % de confianza del test NSSDA con cada modelo digital del terreno.

Tabla 4.15: Tests NSSDA en varios ensayos

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Exactitud horizontal	1.04m	1.50m	2.36m
Exactitud vertical MDT 05m	2.00m	3.01m	4.67m
Exactitud vertical MDT 10m	1.80m	2.91m	4.57m

Estos resultados están de acuerdo con los propuestos por Fischler and Bolles (1981), Hung et al. (1985), Sutherland (1974), Wan and Xu (1996), Haralick et al. (1989), que sostienen que utilizar un número escaso de puntos georeferenciados influye en la calidad posicional del resultado; se observa en la tabla 4.15 un decremento de la calidad posicional debido a verse reducido en un 50 % el número de puntos por imagen, que a su vez es consecuencia de una mayor restricción en el número de imágenes en las que estos deben ser detectados.

En la figura 4.37 se puede apreciar la distribución de los puntos de control del ensayo 1. Las figuras 4.38 y 4.39 muestran la ortofoto y el modelo digital del terreno generados, y las tablas 4.16 y 4.17 sus especificaciones técnicas, respectivamente.

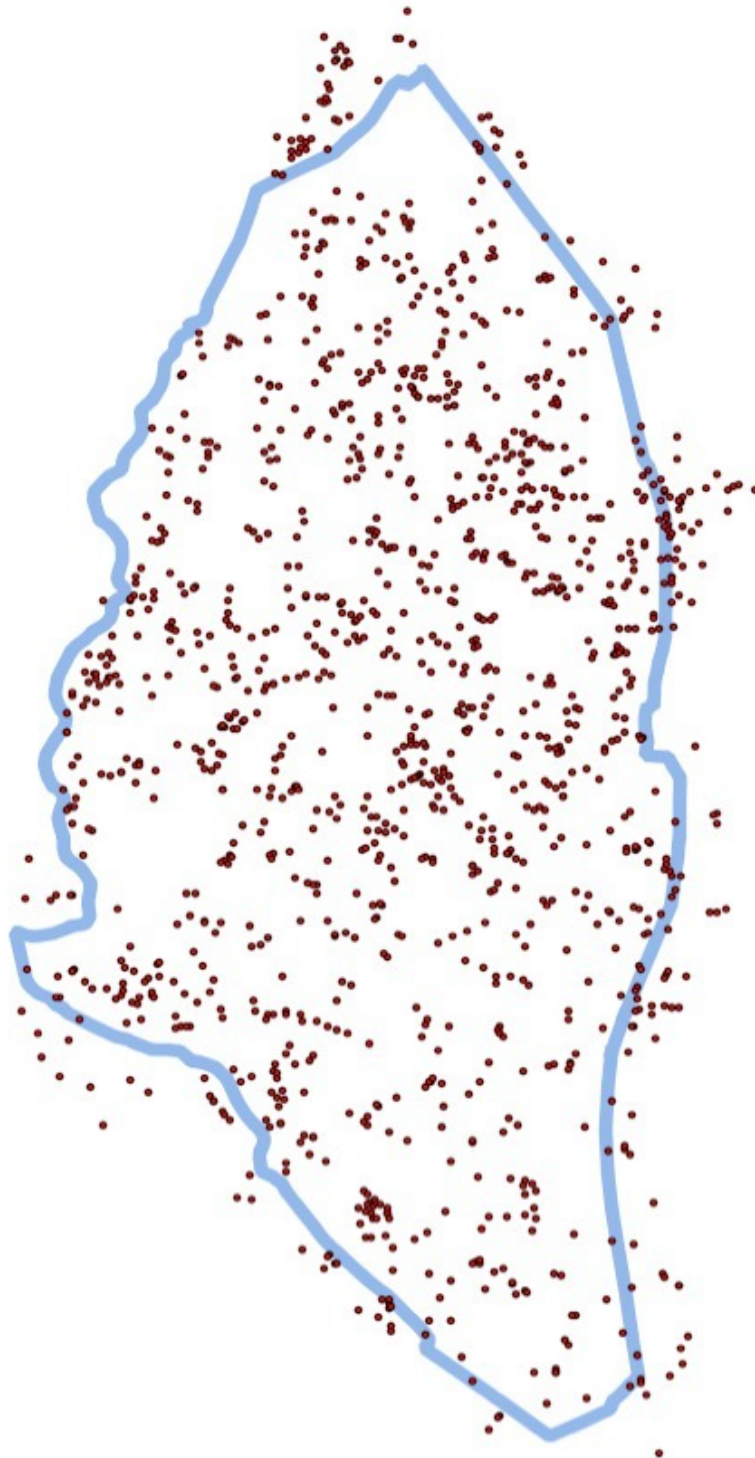


Figura 4.37: Distribución de puntos de control del ensayo 1



Figura 4.38: Ortofoto generada en el ensayo 1

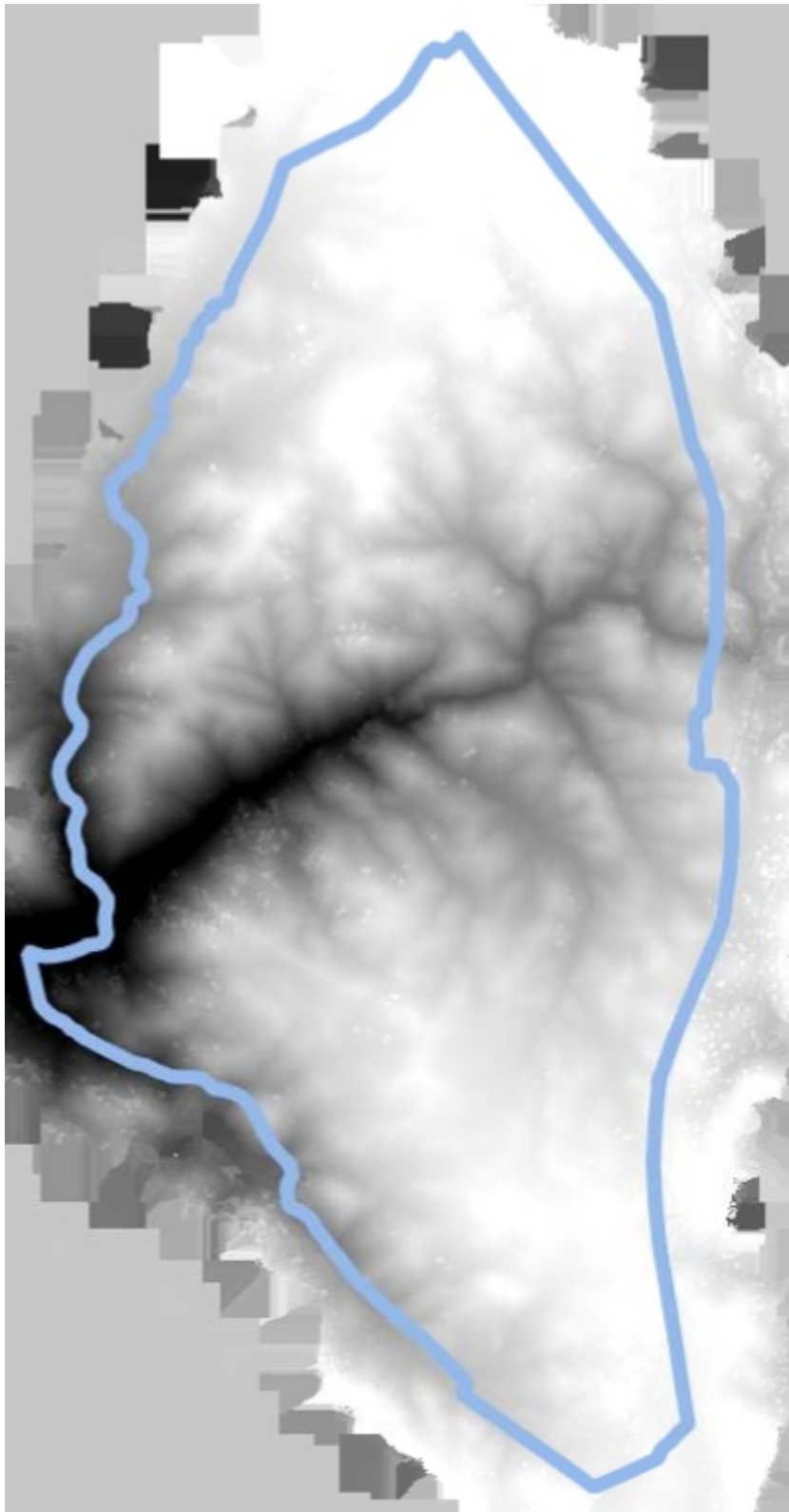


Figura 4.39: Modelo digital del terreno generado en el ensayo 1

Tabla 4.16: Especificaciones técnicas de la ortofoto generada en el ensayo 1

Nombre	ensayo1.tif
Resolución	20.480px x 38.264px
Resolución de pixel	9cm/píxel
Resolución espectral	3 (rojo, verde, azul)
Coordenadas centrales	387.267, 4.228.999 (UTM 30N ETRS 1989)
Extensión	1.843m (horizontal), 3.443m (vertical)
Comprobado para 1.04 metros de exactitud horizontal y 2.00 metros de exactitud vertical al 95 % de nivel de confianza utilizando el Estándar Nacional para la Precisión de Datos Espaciales (NSSDA) (Federal Geographic Data Committee 1998c).	

Tabla 4.17: Especificaciones técnicas del modelo digital del terreno generado en el ensayo 1

Nombre	ensayo1_mdt.tif
Resolución	14.435px x 18.137px
Resolución de pixel	53.8954 cm/píxel
Precisión altimétrica	18cm
Resolución espectral	1
Coordenadas centrales	385.087, 4.229.749 (UTM 30N ETRS 1989)
Extensión	7.779m (horizontal), 9.775m (vertical)

Capítulo 5

Conclusiones

1. El desarrollo de sensores, así como el nacimiento de nuevas herramientas y plataformas que los soportan y transportan han dado lugar a un crecimiento exponencial en cuanto a la disponibilidad y cantidad de información geoespacial generada.
2. Es necesario recurrir a nuevos modelos de representación de información espacial para poder analizar, procesar, transmitir y gestionar ingentes cantidades de información disponible. La metodología propuesta para generar un árbol jerárquico ha demostrado ser un modelo adecuado, sencillo y ágil para llevar a cabo estas tareas.
3. Las plataformas UAV y el software de control múltiple que hemos propuesto han demostrado ser herramientas útiles, robustas y seguras, en los casos de necesidad de: mayor resolución espacial, restricciones para el despegue y aterrizaje, soluciones de bajo coste, etc.
4. Las plataformas empleadas basadas en hardware y software libre, facilitan su integración con otros sistemas y el desarrollo de utilidades complementarias. Especial mención merece el autopiloto APM, solución de bajo coste y un enorme potencial; el protocolo MAVLINK, que podemos considerar las bases de un estándar abierto para comunicar estaciones GCS con plataformas UAV; y los módulos de transmisión inalámbrica de largo alcance xbee, con los que se ha probado que es posible modificar en tiempo real y en pleno vuelo parámetros del UAV, aún cuando éste se encuentra a una distancia de hasta 3 km.
5. Los sensores propuestos y los algoritmos desarrollados han permitido obtener imágenes mediante el uso de cámaras sin precisión métrica, como las cámaras GoPro YHDC5170 y Canon IXUS 220HS. Hemos

comprobado que la sistemática de captura continua con un intervalo definido entre adquisición genera un conjunto de imágenes adecuados para los estudios de optimización y generación de imágenes con métrica.

6. Los algoritmos que hemos desarrollado permiten incorporar a las imágenes adquiridas la información generada por el UAV, válidos para cualquier sensor y cualquier mecanismo de adquisición de imágenes.
7. Las imágenes obtenidas con cámaras sin métrica precisa, deben ser tratadas con técnicas de visión por computador y fotogramétricas, siendo fundamental el papel desempeñado por el algoritmo SIFT y herramientas que lo incorporan, como es el programa MicMac, herramienta de software libre que permite generar modelos tridimensionales e imágenes con métrica a partir de imágenes sin métrica.
8. La optimización de los parámetros de SIFT en función de los contenidos de las imágenes y el uso del software “ImageJ”, permiten obtener un modelo de optimización y mejorar sustancialmente la correlación entre imágenes tomadas con dos cámaras muy diferentes, como las cámaras GoPro YHDC5170 y Canon IXUS 220HS.
9. La existencia de imágenes georeferenciadas, obtenidas de distintas fuentes, el modelo de optimización del algoritmo SIFT, y la facilidad de integración de sistemas basado en código abierto, facilitan establecer un flujo de trabajo entre MicMac e ImageJ, permitiendo asignar orientación absoluta a las imágenes sin necesidad de intervención manual, automatizando completamente el proceso y obtener fotogramas de adecuada calidad posicional.

Bibliografía

- Abdel-Aziz, Y. I. and Karara, H. M. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into objectspace coordinates in close-range photogrammetry. In *Symposium on Close-Range photogrammetry*, volume 1, pages 1–18, Urbana, Illinois. Falls Church, Virginia: American Society of Photogrammetry.
- Abràmoff, M. D., Magalhães, P. J., and Ram, S. J. (2004). Image processing with ImageJ. *Biophotonics International*, 11(7):36–42.
- Achantay, R., Hemamiz, S., Estraday, F., and Susstrunk, S. (2009). Frequency-tuned salient region detection. In *2009 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pages 1597–1604, Miami Beach, Florida. Piscataway, New Jersey: IEEE.
- Alonso-Fernandez, F., Tome-Gonzalez, P., Ruiz-Albacete, V., and Ortega-Garcia, J. (2009). Iris recognition based on sift features. In *2009 International Conference on Biometrics, Identity and Security*, pages 1–8, Tampa, Florida, USA. New York: IEEE.
- Arbab-Zavar, B., Nixon, M. S., and Hurley, D. J. (2007). On model-based analysis of ear biometrics. In *First International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems*, pages 1–5, Crystal City, Virginia, United States. New York: IEEE Systems, Man and Cybernetics.
- Aydin, G., Sayar, A., Gadgil, H., Aktas, M. S., Fox, G. C., Ko, S., Bulut, H., and Pierce, M. E. (2008). Building and applying geographical information system grids. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 20(14):1653–1695.
- Battiatto, S., Gallo, G., Puglisi, G., and Scellato, S. (2007). Sift features tracking for video stabilization. In *ICIAP '07, 14th International conference on Image Analysis and Processing*, pages 825–830, Modena, Italy. Los Alamos, California: IEEE Computer Society.

- Batty, M., Hudson-Smith, A., Milton, R., and Crooks, A. (2010). Map mashups, Web 2.0 and the GIS revolution. *Annals of GIS*, 16(1):1–13.
- Bay, H., Tuytelaars, T., and Van Gool, L. (2006). SURF: Speeded up Robust Features. In Leonardis, A., Bischof, H., and Pinz, A., editors, *Computer Vision - ECCV 2006*, volume 3951 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 404–417. Heidelberg, Berlin: Springer, Graz, Austria.
- Bejarano, M. et al. (2013). *Técnicas de fotogrametría y visión por computador para el modelado 3D de estructuras geomorfológicas dinámicas*. PhD thesis, Universidad de Extremadura.
- Bereuter, P. and Weibel, R. (2012). Algorithms for on-the-fly generalization of point data using quadrees. In *The 2012 AutoCarto International Symposium on Automated Cartography*, Ohio, United States. United States: Cartography and Geographic Information Society.
- Bicego, M., Lagorio, A., Grosso, E., and Tistarelli, M. (2006). On the use of sift features for face authentication. In Schmid, C., Soatto, S., and Tomasi, C., editors, *CVPRW'06*, Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, 2006, pages 35–35, New York. New York: IEEE.
- Bradley, T. H., Moffitt, B. A., Mavris, D. N., and Parekh, D. E. (2007). Development and experimental characterization of a fuel cell powered aircraft. *Journal of Power Sources*, 171(2):793–801.
- Brown, M. and Lowe, D. G. (2003). Recognising panoramas. In *International Conference on Computer Vision*, volume 2, pages 1218–1225, Nice, France. Washington DC, USA: IEEE Computer Society.
- Castillo-Carrion, S., Romero-Jiménez, R., Guerrero-Ginel, J.-E., and Merroño-Larriva, J.-E. (2012). Algorithms and accuracy of transforming orthophoto maps into quadtree tiling for google maps. *Journal of Imaging Science & Technology*, 56(1):0105021–0105028.
- Cesetti, A., Frontoni, E., Mancini, A., Zingaretti, P., and Longhi, S. (2010). A vision-based guidance system for uav navigation and safe landing using natural landmarks. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 57(1-4).
- Chang, A. Y., Parrales, M. E., Jimenez, J., Sobieszczyk, M. E., Hammer, S. M., Copenhaver, D. J., and Kulkarni, R. P. (2009). Combining Google Earth and GIS mapping technologies in a dengue surveillance system for developing countries. *International journal of health geographics*, 8(1):49.

- Chen, D. M., Baatz, G., Koser, K., Tsai, S. S., Vedantham, R., Pylvanainen, T., Roimela, K., Chen, X., Bach, J., Pollefeys, M., et al. (2011). City-scale landmark identification on mobile devices. In *Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 737–744, Colorado Springs, United States. Washington DC: IEEE Computer Society.
- Cheung, W. and Hamarneh, G. (2009). n-SIFT: N-dimensional Scale Invariant Feature Transform. *Transactions on Image Processing*, 18(9):2012–2021.
- Chureesampant, K. and Susaki, J. (2014). Automatic GCP extraction of fully polarimetric SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(1):137–148.
- Cuadrado, O., Felipe, B., and Hernández, D. (2006). Posibles soluciones a la división de hojas de series cartográficas autonómicas. In *V Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, Sevilla, España. Madrid, España: Ministerio de Medio Ambiente.
- De Matías, J., De Sanjosé, J. J., López-Nicolás, G., Sagüés, C., and Guerrero, J. J. (2009). Photogrammetric methodology for the production of geomorphologic maps: Application to the Veleta rock glacier (Sierra Nevada, Granada, Spain). *Remote Sensing*, 1(4):829–841.
- DeChant, L. and Kinney, J. R. (2012). A close-range photogrammetric solution working with zoomed images from digital cameras. *SAE Technical Papers*.
- Dimc, F. and Magister, T. (2006). Mini UAV communication link systems. In *Proceedings of International Conference on Traffic Science*, Portoroz, Slovenija.
- Drewniok, C. and Rohr, K. (1997). Exterior orientation - an automatic approach based on fitting analytic landmark models. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 52(3):132–145.
- Eisenbeiss, H. (2004). A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. *International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5/W1).
- Elissalde, P. (2007). 2D/3D Web-Mapping. *Hydro International*, 11(3):17–19.
- Ethrog, U. (1984). Non-metric camera calibration and photo orientation using parallel and perpendicular lines of the photographed objects. *Photogrammetria*, 39(1):13–22.

- EU (2007). Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 Establishing an Infrastructure for Spatial information in the European Community (INSPIRE). *Official Journal of the European Union*.
- Federal Geographic Data Committee (1998a). Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 1: Reporting Methodology. Technical report, FGDC-STD-0007.1-1998.
- Federal Geographic Data Committee (1998b). Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 2: Standards for Geodetic Networks. Technical report, FGDC-STD-007.2-1998.
- Federal Geographic Data Committee (1998c). Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. Technical report, FGDC-STD-007.3-1998.
- Fischler, M. A. and Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6):381–395.
- García Martín, R., de Castro Fernández, J. P., Verdú Pérez, E., Verdú Pérez, M. J., and Regueras Santos, L. M. (2013). An OLS regression model for context-aware tile prefetching in a web map cache. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(3):614–632.
- Geng, L., Li, S., Su, S., Cao, D., Lei, Y., and Ji, R. (2013). A new camera self-calibration method based on CSA. In *VCIP, Visual Communications and Image Processing*, pages 1–6, Kuching, Sarawak, Malaysia. Piscataway, New Jersey: IEEE.
- Girod, B., Chandrasekhar, V., Chen, D. M., Cheung, N., Grzeszczuk, R., Reznik, Y., Takacs, G., Tsai, S. S., and Vedantham, R. (2011). Mobile visual search. *IEEE Signal Processing Magazine*, 28(4):61–76.
- Guan, X., Wu, H., and Li, L. (2012). A parallel framework for processing massive spatial data with a split-and-merge paradigm. *Transactions in GIS*, 16(6):829–843.
- Haralick, B. M., Lee, C., Ottenberg, K., and Nölle, M. (1994). Review and analysis of solutions of the three point perspective pose estimation problem. *International Journal of Computer Vision*, 13(3):331–356.

- Haralick, R. M., Joo, H., Lee, D., Zhuang, S., Vaidya, V. G., and Kim, M. B. (1989). Pose estimation from corresponding point data. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 19(6):1426–1446.
- Heipke, C. (1997). Automation of interior, relative, and absolute orientation. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 52(1):1–19.
- Henze, N., Schinke, T., and Boll, S. (2009). What is that? object recognition from natural features on a mobile phone. In *Proceedings of the Workshop on Mobile Interaction with the Real World*, Bonn, Germany.
- Hernández-López, D., Felipe-García, B., and González-Matesanz, F. J. (2006). *Orto_pnoa_Etrs89_vs_Ed50: Programa para transformar la georeferenciación de imágenes Tiff y GeoTiff de Etrs89 a Ed50, y viceversa, según las directrices PNOA 1.0*. Spain, University of Castilla - La Mancha.
- Hirokawa, R., Kubo, D., Suzuki, S., Meguro, J., and Suzuki, T. (2007). A small UAV for immediate hazard map generation. In *AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit*, volume 1, pages 153–158, California, United States. Reston, Virginia, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Horn, B. K. P. (1987). Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America A*, 4(4):629–642.
- Hu, C., Huang, X., Hu, J., and Zhu, J. (2004). System identification of a small UAV’s speeding up process before take-off. In *2004 5th Asian Control Conference*, volume 1, pages 392–395, Melbourne, Australia. Piscataway, New Jersey, United States: IEEE.
- Hung, Y., Yeh, P., and Harwood, D. (1985). Passive ranging to known planar point sets. In *International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 80–85, St. Louis, Missouri, United States. New York: IEEE.
- Jagadish, K. and Sinzinger, E. (2008). Image matching using high dynamic range images and radial feature descriptors. In Bebis, G., Boyle, R. D., Parvin, B., Koracin, D., Remagnino, P., Porikli, F. M., Peters, J., Kłosowski, J. T., Arns, L. L., Chun, Y. K., Rhyne, T. M., and Monroe, L., editors, *ISVC (1)*, volume 5358 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 359–369, Las Vegas, Nevada, United States. Springer.
- Jenaro-de Mencos, G. (2013). Las plataformas aéreas no tripuladas. *Revista ejército*, 868:80–88.

- Jenaro-de Mencos, G. and Piñeiro-García-de León, J. J. (2014). Nano vehículos aéreos no tripulados en operaciones militares. *Revista ejército*, 875:64–70.
- Ji, Q., Costa, M. S., Haralick, R. M., and Shapiro, L. G. (2000). A robust linear least-squares estimation of camera exterior orientation using multiple geometric features. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 55(2):75–93.
- Kang, Y. K., Kim, K., and Kim, Y. S. (2001). Probability-based tile prefetching and cache replacement algorithms for web geographical information systems. In Caplinskas, A. and Eder, J., editors, *Advances in Databases and Information Systems*, volume 2151 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 127–140. Heidelberg, Berlin, Germany: Springer, Vilnius, Lithuania.
- Ke, Y. and Sukthankar, R. (2004). PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors. In *CVPR'04*, volume 2 of *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 506–513, Washington DC, USA. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society.
- Kefaloukos, P. K., Vaz Salles, M., and Zachariasen, M. (2012). Tileheat: A framework for tile selection. In Cruz, I. F., Knoblock, C. A., Kroger, P., Tanin, E., and Widmayer, P., editors, *SIGSPATIAL '12, GIS: Proceedings of the ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, pages 349–358, New York, USA. ACM.
- Kisku, D. R., Rattani, A., Grosso, E., and Tistarelli, M. (2007). Face identification by SIFT-based complete graph topology. In *Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies*, pages 63–68, Alghero, Italy. Piscataway, New Jersey, United States: IEEE.
- Kittenberger, T., Ferner, A., and Scheikl, R. (2014). A simple computer vision based indoor positioning system for educational micro air vehicles. *Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 8(1):46–52.
- Li, Y. and Bretschneider, T. R. (2007). Semantic-sensitive satellite image retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(4):853–860.

- Lim, H., Park, J., Lee, D., and Kim, H. J. (2012). Build your own quadrotor: Open-source projects on unmanned aerial vehicles. *Robotics & Automation Magazine*, 19(3):33–45.
- Lingua, A., Marenchino, D., and Nex, F. (2009a). A comparison between old and new feature extraction and matching techniques in photogrammetry. *Journal of Geodesy and Cadastre - RevCAD*, 9:43–52.
- Lingua, A., Marenchino, D., and Nex, F. (2009b). Performance analysis of the SIFT operator for automatic feature extraction and matching in photogrammetric applications. *Sensors*, 9(5):3745–3766.
- Liu, L., Wang, Y., and Wang, Y. (2008). SIFT based automatic tie-point extraction for multitemporal SAR images. In Qi, L., editor, *ETTANDGRS '08*, volume 1 of *International Workshop on Education Technology and Training, 2008. 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing*, pages 499–503, Shanghai, China. Los Alamitos, California, USA: IEEE Computer Society.
- Llopis, J. (2006). *Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio: entrada, manejo, análisis y salida de datos espaciales : teoría general y práctica para ESRI ArcGIS 9*. Editorial Club Universitario, Alicante, España.
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2):91–110.
- May, M., Turner, M. J., and Morris, T. (2010). Object Recognition from Infra Red image data for Mobile Platforms: Scale Invariant Feature Transform - A Graphical Parameter Analysis. In *MCM-ITP*, volume 1, pages 29–40, Manchester, United Kingdom. MCM-ITP.
- Mayalarp, V., Limpaswadpaisarn, N., Poombansao, T., and Kittipiyakul, S. (2010). Wireless mesh networking with XBee. In *2nd ECTI-Conference on Application Research and Development (ECTI-CARD 2010)*, pages 10–12, Pattaya, Chonburi, Thailand.
- Meaden, G. J. and Kapetsky, J. M. (1992). *Los sistemas de información geográfica y la telepercepción en la pesca continental y la acuicultura*. FAO: Documento Técnico de Pesca. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia.

- Metternicht, G. (2006). Consideraciones acerca del impacto de Google Earth en la valoración y difusión de los productos de georrepresentación. *GeoFocus*, 6:1–10.
- Mirón-Pérez, J. (2005). El catastro y la reforma de la Política Agraria Común de la UE: la implantación del SIGPAC. *CT: Catastro. Revista de la Dirección General del Catastro*, 54:7–40.
- Morgado, A. and Dowman, I. (1997). A procedure for automatic absolute orientation using aerial photographs and a map. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 52(4):169–182.
- Neitzel, F. and Klonowski, J. (2011). Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38:39–44.
- Núñez-Alonso, J. (1989). Evolución conceptual y técnica de los sistemas de información geográfica: la agenda pendiente. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 9:81–96.
- Papachristou, C. and Delopoulos, A. N. (2014). A method for the evaluation of projective geometric consistency in weakly calibrated stereo with application to point matching. *Computer Vision and Image Understanding*, 119:81–101.
- Park, U., Pankanti, S., and Jain, A. K. (2008). Fingerprint verification using SIFT features. In Vijaya-Kumar, B. V. K., Prabhakar, S., and Ross, A. A., editors, *Biometric Technology for Human Identification V*, volume 6944, page 69440K, Orlando, Florida, United States. Washington, USA: SPIE.
- Pascual, A. R., Power, P. A., Jiménez, J. A., and Maganto, A. S. (2006). La Infraestructura de Datos Espaciales de España (IDEE): un proyecto colectivo y globalizado. *Avances en las infraestructuras de datos espaciales*, 26:15–30.
- Potere, D. (2008). Horizontal positional accuracy of Google Earth’s high-resolution imagery archive. *Sensors*, 8(12):7973–7981.
- Primicerio, J., Di Gennaro, S. F., Fiorillo, E., Genesio, L., Lugato, E., Matese, A., and Vaccari, F. P. (2012). A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 13(4):517–523.
- Quinn, S. and Gahegan, M. (2010). A predictive model for frequently viewed tiles in a web map. *Transactions in GIS*, 14(2):193–216.

- Rattani, A., Kisku, D. R., Bicego, M., and Tistarelli, M. (2007). Feature level fusion of face and fingerprint biometrics. In *BTAS 2007, First IEEE International Conference on Biometrics: Theory, Applications, and Systems*, pages 1–6, Crystal City, Virginia, United States. New York: IEEE Systems, man and cybernetics.
- Remondino, F. (2006). Detectors and descriptors for photogrammetric applications. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(3):49–54.
- Rodríguez-Pascual, A. F., Abad-Power, P., Alonso-Jiménez, J. A., Sánchez-Maganto, A., Ayuso-González, J. E., and Vilches-Blázquez, L. M. (2007). Las IDE como evolución natural de los SIG. Technical report, Instituto Geográfico Nacional.
- Romero-Jiménez, R., Castillo-Carrión, S., Meroño-de-Larriva, J. E., and Guerrero-Ginel, J. E. (2011). *Integración de ortofotografías digitales en plataformas web de consulta y visualización, Trabajo profesional fin de carrera*. Universidad de Córdoba.
- Samet, H. (1984). The quadtree and related hierarchical data structures. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 16(2):187–260.
- Sample, J. T. and Ioup, E. (2010). *Tile-based geospatial information systems*. New York, USA: Springer.
- Sargeant, N. (2012). *Unmanned aerial vehicle payload development for aerial survey*. PhD thesis, Murdoch University.
- Schmale, D. G., Dingus, B. R., and Reinholtz, C. (2008). Development and application of an autonomous unmanned aerial vehicle for precise aerobiological sampling above agricultural fields. *Journal of Field Robotics*, 25(3):133–147.
- Sevaldson, M. C. (2012). Trajectory Learning for Highly Aerobatic Unmanned Aerial Vehicle. Master’s thesis, University of Bergen, Norway.
- Sima, A. and Buckley, S. J. (2013). Optimizing SIFT for Matching of Short Wave Infrared and Visible Wavelength Images. *Remote Sensing*, 5(5):2037–2056.
- Srinivas, B. S., Ladner, R. E., Azizoglu, M., and Riskin, E. A. (1999). Progressive transmission of images using MAP detection over channels with memory. *IEEE Transactions on Image Processing*, 8(4):462–475.

- Sullivan, D. and Brown, A. (2002). High accuracy autonomous image georeferencing using a GPS/Inertial-aided digital imaging system. In *Proceedings of the 2002 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, California, United States. Citeseer.
- Sutherland, I. E. (1974). Three-dimensional data input by tablet. *Proceedings of the IEEE*, 62(4):453–461.
- Todd, M., Mascarenas, D., Flynn, E., Rosing, T., Lee, B., Musiani, D., Dasgupta, S., Kpotufe, S., Hsu, D., Gupta, R., et al. (2007). A different approach to sensor networking for SHM: Remote powering and interrogation with unmanned aerial vehicles. In Chang, F. K., editor, *Proceedings of the 6th International workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, California, United States. Citeseer.
- Toeppen, J. and Sykes, D. (2009). Digital stereoscopic photography using stereodata maker. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 7237. SPIE.
- Wagner, D., Reitmayr, G., Mulloni, A., Drummond, T., and Schmalstieg, D. (2008). Pose tracking from natural features on mobile phones. In *Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pages 125–134, Cambridge, United Kingdom. Washington DC, USA: IEEE Computer Society.
- Wallis, C., Wallace, R., Tarboton, D. G., Watson, D. W., Schreuders, K. A. T., and Tesfa, T. K. (2009). Hydrologic terrain processing using parallel computing. In Anderssen, R. S., Braddock, R. D., and Newham, L. T. H., editors, *18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation: Interfacing Modelling and Simulation with Mathematical and Computational Sciences*, pages 2540–2545, Cairns, Australia. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, International Association for Mathematics and Computers in Simulation.
- Wan, X. and Xu, G. (1996). Camera parameters estimation and evaluation in active vision system. *Pattern Recognition*, 29(3):439–447.
- Wessel, B., Huber, M., and Roth, A. (2007). Registration of near real-time SAR images by image-to-image matching. *PIA07, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(3):179–184.

- Wright, G. G., Matthews, K. B., Cadell, W. M., and Milne, R. (2003). Reducing the cost of multi-spectral remote sensing: combining near-infrared video imagery with colour aerial photography. *Computers and Electronics in Agriculture*, 38(3):175–198.
- Wyllie, T. (2001). Parachute recovery for UAV systems. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 73(6):542–551.
- Xu, D., Yuan, Z., Yu, T., Xie, D., Zheng, F., and Zheng, G. (2012). The research of remote sensing image segmentation and release which are based on tile map service. In *2012 International Symposium on Geomatics for Integrated Water Resources Management (GIWRM)*, pages 1–4, Lanzhou, Gansu, Chinese. New York, USA: IEEE eXpress Conference Publishing.
- Yi, Z., Zhiguo, C., and Yang, X. (2008). Multi-spectral remote image registration based on SIFT. *Electronics Letters*, 44(2):107–108.
- Yuan, Z. L., Li, X., Wang, J. L., Yuan, Q. Q., Xu, D., and Diao, J. J. (2011). Methods of 3D map storage based on geo-referenced image database. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(3):654 – 658.
- Zhang, J. and You, S. (2010). Dynamic tiled map services: Supporting query-based visualization of large-scale raster geospatial data. In *COM.Geo '10*, Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on Computing for Geospatial Research & Application, Bethesda, Maryland, USA. New York, USA: ACM.
- Zhao, H., Gou, Z., Gao, P., and Cheng, Y. (2008). No ground control point making the orthophoto for the UAV remote sensing system. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 6625, pages 66250C–66250C, Beijing, China. SPIE.

Anexos

En Anexos describimos brevemente aquellos documentos que hemos elaborado y algoritmos que hemos desarrollado, referenciando su localización en el soporte de almacenamiento que acompaña la tesis. En aquellos casos en los que no son demasiado extensos, se incluye directamente en el Anexo.

Anexo A

Código desarrollado para integrar ortofotografías en un sistema universal

Los ficheros de este apartado están localizados en el directorio *Anexos/A_1* del soporte de almacenamiento que acompaña esta tesis.

A.1. JA2Google.pl

Fichero que implementa los algoritmos descritos en el apartado 4.1.1.2 de la tesis, referentes a generación de teselas hoja y niveles superiores. Las funciones que se implementan en este fichero son:

- nombre2Orto: Función recursiva principal que genera teselas hoja y las combina para generar los niveles superiores.
- GenerarBlank: Genera una tesela blanca en caso de que no exista información geoespacial en el área.
- Fusionar: Función recursiva ejecutada por nombre2Orto que realiza las operaciones de combinación de teselas para generar niveles superiores.
- AbaDer, Der, Aba: Funciones recursivas que devuelven el nombre de las teselas situadas abajo y a la derecha, a la derecha, y abajo de la tesela actual respectivamente.
- GenCoor: Función que implementa la ecuación 3.1.

- CalcCoordCorte: Recibe una ortofoto que contiene parte de la tesela a generar, y las coordenadas del área que se desea generar, y devuelve las coordenadas que define la intersección de la ortofoto con el área a generar.
- ProcesaG: Recibe las coordenadas x,y UTM y las dimensiones de la tesela que se debe generar, y la genera.
- CargarLOrto: Lee el contenido del repositorio de ortofotos en el sistema de ficheros y lo carga en memoria.

A.2. blank.tif, blank.jpg

Ficheros que representan regiones de las que no se posee información geoespacial.

A.3. Orto.pm

Define la estructura de datos empleada para almacenar información en memoria del repositorio de archivos de ortofotos. Atributos:

- nombre: nombre de la ortofoto.
- x1,y1: coordenada superior izquierda de la ortofoto.
- x2,y2: coordenada inferior derecha de la ortofoto.
- tam_pixel: resolución de pixel.

Métodos:

- new: crea la instancia.
- AsignarSinDim: inicializa la instancia recibiendo como parámetros el valor de todos los atributos.
- Asignar0: Igual que AsignarSinDim, pero recibe como parámetros una instancia a partir de la cual se inicializan los atributos de la nueva instancia.
- Asignar: inicializa la instancia recibiendo como parámetros x1,y1,tam_pixel, y resolución en píxeles de la ortofoto. En función de la resolución en píxeles, y el valor del resto de atributos, calcula x2,y2.

- Imprimir: imprime por pantalla información de la instancia.
- PContiene: Devuelve 1 si la coordenada que recibe como parámetro está contenida en la ortofoto.
- PDer: devuelve 1 si la coordenada x1 de la ortofoto es menor o igual que la coordenada x2 de la región que recibe como parámetro
- PArr: devuelve 1 si la coordenada y2 de la ortofoto es superior que la coordenada y1 de la región que recibe como parámetro.
- PDown: devuelve 1 si la coordenada y1 de la ortofoto es inferior a la coordenada y2 de la región que recibe como parámetro.

A.4. params.pl

Archivo de configuración que define:

- Directorio origen del repositorio de ortofotos. Las ortofotos deben estar en formato jpg, con archivos de georeferenciación jgw y sistemas de coordenadas epsg:4326.
- Extensión utilizada por las ortofotos en el sistema de ficheros.
- Directorio temporal en el que efectuar las operaciones.
- Directorio destino en el que generar el árbol jerárquico.
- Resolución en píxeles de cada tesela del árbol.
- Resolución espacial del píxel de cada tesela hoja del árbol.
- Nombre de la tesela raíz del árbol a generar.
- Número de niveles a generar.
- Comandos a utilizar para actuar sobre los ficheros en función del sistema operativo utilizado. En este caso, está configurado para ejecutarse en un entorno linux.

Anexo B

Código desarrollado para control y tratamiento de datos de APM

Los ficheros de este apartado están localizados en el directorio *Anexos/A_2* del soporte de almacenamiento que acompaña esta tesis.

B.1. ard_pos_att.pl

Recibe un fichero de telemetría generado por APM, y filtra su contenido para mostrar únicamente datos de navegación. Previamente al tratamiento, en el fichero de telemetría se debe sustituir todas las “,” por “.”, y sustituir espacios en blanco consecutivos por un sólo espacio en blanco.

B.2. Cambio de formato temporal

El siguiente comando ejecutado desde una *shell* de linux toma un fichero generado con ard_pos_att.pl, y añade una nueva columna formateando cada marca de tiempo como el número de segundos transcurridos desde las 00:00:00 hasta el momento de la captura:

```
cat fichero.txt | awk 'BEGIN{FS=" "}{ print _$0"_" $2*3600+$3*60+$4}' >fichero_seg.txt
```

B.3. Listado de imágenes y marca temporal de adquisición

El siguiente comando ejecutado desde una *shell* de linux genera un listado con las imágenes del directorio, y para cada una de ellas los segundos transcurridos desde las 00:00:00 hasta el momento de adquisición.

```
ls *.JPG -l|awk '{cmd="exif_"$1"_"_grep_2013_"_head_-n_1";  
cmd_"_getline_res;print_$1"_"_res}' | awk 'BEGIN{FS="_"  
"}{print_$1"_"$6}' | awk 'BEGIN{FS="_|:"}{print_$1"_"$2  
*3600+$3*60+$4}'>img_seg.txt
```

B.4. ard_img.pl

Recibe un fichero de imágenes y telemetría de APM, formateadas temporalmente utilizando los algoritmos anteriores, y genera un listado con información de navegación para cada imagen aérea adquirida.

B.5. Cam_Movement.pde

Optimización del código de APM que actúa sobre un dispositivo de estabilización, generando un código que consume una cantidad menor de memoria.

```
void cam_stabilisation()  
{  
    APMRC.OutputCh(TILT_SERVO, 1325 + ((ahrs.  
        pitch_sensor/100) * -TILT_RATIO * TILT_REV));  
        // middle servo value + (pitch angle * ms  
        /deg * reverse)  
    APMRC.OutputCh(ROLL_SERVO, 1450 + ((ahrs.  
        roll_sensor/100) * -ROLL_RATIO * ROLL_REV)); //  
        middle servo value + (roll angle * ms/deg *  
        reverse)  
}
```

B.6. script de control automático de cámaras con firmware CHDK

Se desarrolla un script para implementar la metodología de captura automática mencionada en la sección 4.3.1, cuyo código se muestra a continuación:

```
@title Captura Imagenes
@param a = interval (sec)
@default a 3
@param c Time active (m)
@default c 45
@param j Zoom-step
@default j -100 rem step 30 is equivalent to 50 mm SLR
        focal length
@param z Start delay (s)
@default z 5

rem e tiempo en milisegundos que se ejecuta el script
e=c*60000

rem Primer disparo
rem set_zoom j
rem disparo

rem Pausa
for n=0 to z
    print "Comienzo_Captura_en:_" ; z-n ; "s"
    sleep 1000
next n

rem g es tiempo transcurrido, f tiempo de comienzo y p las
    capturas
g=0
f=get_tick_count
p=0

do
    set_zoom j
    s = get_tick_count
        shoot
    sleep a*1000 - (get_tick_count - s)
    g=s-f
```

```
rem t es el tiempo que queda en milisegundos
t=(e-g)/1000
p=p+1
print "Script_Ejecutandose..."
print "Intervalo:";a;"s;_Zoom:";j
print "Tiempo_restante:";t;"s_"(;"c*60;"s)"
print "Capturas_tomadas:";p;"_"(;"c*60/a;"s)"
print "(Presiona_disparo_para_quitar)"
if g>e then shut_down
until ( 0 )
```

Anexo C

Ficheros y código desarrollado en el estudio de la optimización de parámetros del algoritmo SIFT

Los ficheros de este apartado están localizados en el directorio *Anexos/A_3* del soporte de almacenamiento que acompaña esta tesis.

C.1. crear_ortobase.sh + img.txt

Script que dada una ortofoto georeferenciada, una lista de imágenes, coordenadas y parámetros definidos en img.txt, para cada imagen extrae una región de la ortofoto centrada en las coordenadas de la imagen, con una extensión especificada en img.txt.

C.2. siftGCP.ijm + img.txt

Macro que se ejecuta en ImageJ. Correlaciona por lotes imágenes aéreas con sus respectivas regiones de ortofoto. El fichero img.txt especifica la optimización a emplear en los parámetros de SIFT.

C.3. Experimento1.pdf-Experimento12.pdf

Tablas que muestran de forma detallada los resultados del proceso de optimización. Experimento12.pdf y la tabla C.1 muestran de forma simplificada

la información contenida en Experimento1-Experimento10, que optimizan los parámetros sigma y nScales. Experimento11.pdf estudia la optimización de NNDR y FDS.

Tabla C.1: Resumen de los resultados mostrados en Experimento1.pdf-Experimento10.pdf

sigma	nScales	GOPR0004.JPG	GOPR0038.JPG	GOPR0040.JPG	GOPR0043.JPG	GOPR0105.JPG	GOPR0086.JPG	GOPR0052.JPG	GOPR0074.JPG	GOPR0236.JPG	GOPR0188.JPG	GOPR0135.JPG
		SM										
0.5	3	1	20	39	55	90	69	40	35	59	55	57
1.6	3	5	8	18	29	40	27	17	18	25	26	27
1.6	6	1	21	37	65	89	70	44	30	53	72	68
1.6	9	1	56	122	255	296	215	157	165	177	253	194
2	3	3	5	9	18	20	20	13	11	15	17	10
2	6	1	21	45	58	77	57	43	33	53	62	56
2	9	1	18	28	54	85	57	34	37	53	58	53
2.6	3	2	5	6	8	10	9	10	5	9	10	12
2.6	6	3	9	13	25	45	33	22	15	29	39	24
2.6	9	7	22	48	77	120	93	78	64	95	94	83
sigma	nScales	CMR										
0.5	3	0.00	85.00	82.05	85.45	94.44	86.96	75.00	91.43	93.22	87.27	78.95
1.6	3	80.00	87.50	88.89	100.00	92.50	85.19	88.24	83.33	80.00	73.08	77.78
1.6	6	0.00	80.95	81.08	89.23	88.76	91.43	79.55	86.67	83.02	88.89	86.76
1.6	9	0.00	83.93	88.52	93.33	93.24	92.09	85.99	96.36	94.92	96.84	94.33
2.0	3	0.00	80.00	55.56	77.78	85.00	85.00	76.92	72.73	73.33	70.59	90.00
2.0	6	0.00	85.71	84.44	84.48	85.71	89.47	90.70	87.88	96.23	88.71	89.29
2.0	9	0.00	66.67	82.14	92.59	91.76	85.96	94.12	81.08	96.23	84.48	90.57
2.6	3	0.00	80.00	100.00	87.50	90.00	88.89	90.00	80.00	88.89	80.00	75.00
2.6	6	33.33	77.78	92.31	92.00	91.11	84.85	90.91	80.00	79.31	92.31	87.50
2.6	9	57.14	81.82	85.42	77.92	90.00	87.10	88.46	84.38	91.58	91.49	86.75
sigma	nScales	GOPR0057.JPG	GOPR0257.JPG	GOPR0261.JPG	GOPR0323.JPG	GOPR0039.JPG	GOPR0077.JPG	GOPR0244.JPG	GOPR0198.JPG	GOPR0258.JPG	GOPR0259.JPG	GOPR0099.JPG
		SM										
0.5	3	43	1	21	30	34	43	21	28	1	1	16
1.6	3	9	5	10	11	14	18	13	12	1	8	12
1.6	6	34	23	21	35	25	42	18	33	1	13	17
1.6	9	111	67	63	110	93	158	57	99	42	47	63
2	3	8	3	6	12	8	13	4	7	4	1	8
2	6	26	14	20	29	33	48	18	28	8	10	19
2	9	24	14	17	29	23	30	14	20	10	11	17
2.6	3	6	3	4	6	3	3	4	4	3	4	5
2.6	6	14	8	12	13	11	22	11	14	6	5	14
2.6	9	50	15	24	38	42	55	28	44	13	21	30
sigma	nScales	CMR										
0.5	3	86.05	0.00	85.71	90.00	82.35	95.35	71.43	89.29	0.00	0.00	93.75
1.6	3	88.89	20.00	90.00	63.64	85.71	77.78	92.31	91.67	0.00	62.50	83.33
1.6	6	79.41	73.91	85.71	82.86	92.00	83.33	66.67	81.82	0.00	84.62	94.12
1.6	9	89.19	80.60	93.65	92.73	87.10	90.51	77.19	91.92	73.81	89.36	80.95

Anexo C. Ficheros y código desarrollado en el estudio de la optimización de parámetros
del algoritmo SIFT

2.0	3	100.00	33.33	50.00	75.00	75.00	61.54	75.00	71.43	75.00	0.00	75.00
2.0	6	80.77	57.14	80.00	79.31	78.79	87.50	88.89	85.71	75.00	50.00	94.74
2.0	9	91.67	35.71	88.24	82.76	78.26	76.67	92.86	85.00	70.00	72.73	88.24
2.6	3	83.33	0.00	0.00	100.00	33.33	66.67	75.00	100.00	0.00	75.00	80.00
2.6	6	85.71	100.00	91.67	92.31	72.73	86.36	72.73	85.71	66.67	80.00	92.86
2.6	9	94.00	100.00	62.50	73.68	88.10	94.55	89.29	93.18	92.31	85.71	90.00
sigma	nScales	GOPR0111.JPG	GOPR0138.JPG	GOPR0061.JPG								
		SM										
0.5	3	41	66	30								
1.6	3	19	27	12								
1.6	6	42	61	29								
1.6	9	158	203	113								
2	3	13	18	10								
2	6	42	52	31								
2	9	39	50	20								
2.6	3	8	6	5								
2.6	6	28	30	20								
2.6	9	64	105	43								
		CMR										
0.5	3	87.80	87.88	96.67								
1.6	3	89.47	92.59	91.67								
1.6	6	88.10	88.52	89.66								
1.6	9	89.87	91.63	88.50								
2.0	3	84.62	77.78	80.00								
2.0	6	83.33	88.46	87.10								
2.0	9	76.92	86.00	100.00								
2.6	3	87.50	66.67	100.00								
2.6	6	92.86	96.67	90.00								
2.6	9	93.75	94.29	95.35								

C.4. Experimento13.pdf

La tabla C.2 y este fichero muestran de forma detallada el resultado del proceso de validación que se ilustró en la tabla 4.11.

Tabla C.2: Resumen de los resultados mostrados en Experimento13.pdf

sigma	nScales	GOPR0067.JPG	GOPR0114.JPG	GOPR0115.JPG	GOPR0056.JPG	GOPR0076.JPG	GOPR0078.JPG	GOPR0137.JPG	GOPR0234.JPG	GOPR0235.JPG	GOPR0237.JPG
		SM									
2.6	6	19	20	19	23	17	19	25	34	39	29
2.6	9	50	35	38	41	43	62	87	80	67	74
		CMR									
2.6	6	84.21	80.00	89.47	86.96	82.35	84.21	92.00	82.35	89.74	89.66
2.6	9	92.00	94.29	94.74	97.56	90.70	87.10	95.40	92.50	98.51	89.19

Anexo D

Ficheros y código desarrollado para generación automática de imágenes con métrica

Los ficheros de este apartado están localizados en el directorio *Anexos/A-4* del soporte de almacenamiento que acompaña esta tesis.

D.1. Validación de la optimización en un vuelo programado

En la tabla D.1 se puede apreciar de forma más detallada la información proporcionada en la tabla 4.13. Los valores CMR para $\text{inliers}=10$ se han calculado para una muestra de 50 correlaciones aleatorias en cada par *imagen aérea-región de ortofoto*, debido al elevado número de correlaciones detectadas. Cada imagen aérea se representa con un identificador formado por 4 números.

Tabla D.1: Optimización del filtrado RANSAC. Valores de SM y CMR asignando diferentes errores de alineación

	Imágenes Aéreas											
	7175	7185	7195	7205	6955	6965	6975	7224	7234	7244	7312	7322
	SM											
Inliers=1.1	21	25	27	19	18	26	26	27	23	31	22	28
Inliers=10	183	194	169	123	152	180	185	241	168	282	173	266
	CMR											
Inliers=1.1	100.00	96.00	100.00	100.00	94.44	96.15	92.31	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Inliers=10	94.00	94.00	86.00	90.00	88.00	98.00	96.00	94.00	94.00	90.00	92.00	94.00
	Imágenes Aéreas											
	7346	7356	7366	7409	7414	7039	7049	7059	7082	7092	7102	7112
	SM											
Inliers=1.1	8	37	18	15	10	14	38	43	29	55	18	21
Inliers=10	58	273	119	90	73	122	292	352	210	435	185	152
	CMR											
Inliers=1.1	87.50	94.59	94.44	93.33	90.00	100.00	97.37	95.35	100.00	98.18	94.44	100.00
Inliers=10	90.00	92.00	90.00	94.00	92.00	92.00	92.00	96.00	96.00	92.00	98.00	88.00

D.2. Identificación de GCPs

Tras aplicar el algoritmo comentado en C.2 a cada par *imagen aérea-región ortofoto*, se filtra el resultado para asignar a cada imagen un conjunto de coordenadas píxeles - coordenadas geográficas según el siguiente código:

D.3. imgcp_imgcp.pl

Implementación del algoritmo del apartado 4.3.5.2. Utilizando los puntos de control detectados en el apartado D.2, y el resultado del proceso de *matching* del comando *Tapioca* de MicMac, se añaden aquellos puntos de control de las imágenes adyacentes que hayan sido detectados también con el

comando *Tapioca*, y se crea un fichero compatible con el formato de MicMac para calcular el modelo de orientación absoluta automáticamente.

Adicionalmente, se generan dos archivos con fines estadísticos: *log_exp* y *gcp_exp*.

D.4. Rutina auxiliar para el cálculo estadístico

Se desarrolla una rutina auxiliar que procesa el resultado de aplicar el algoritmo de la sección D.3 a cada ensayo:

```
log="log_exp";for file in `ls *JPG`; do f=$( echo $file | cut
-d '.' -f 1);count=$(grep $f')\?;' $log | wc -l);echo $f"
_"$count; done
```

Aplicando la rutina a cada ensayo, se obtiene la siguiente tabla que muestra el número de puntos de control que hay en cada imagen, a partir de la cual se obtiene la tabla 4.14 mencionada anteriormente.

Tabla D.2: Puntos de control detectados en cada imagen para cada ensayo

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
MEDIA	10,4217252396	5,5015974441	2,3642172524
DESVIACIÓN	6,0881169114	4,1309685651	2,0384754494
Puntos de control por imagen			
r-1-2-IMG_6955.JPG	7	2	1
r-1-2-IMG_6956.JPG	12	3	2
r-1-2-IMG_6957.JPG	11	3	1
r-1-2-IMG_6958.JPG	17	3	1
r-1-2-IMG_6959.JPG	21	6	3
r-1-2-IMG_6960.JPG	12	6	2
r-1-2-IMG_6961.JPG	15	9	4
r-1-2-IMG_6962.JPG	14	10	2
r-1-2-IMG_6963.JPG	9	5	1
r-1-2-IMG_6964.JPG	9	5	1
r-1-2-IMG_6965.JPG	9	2	1
r-1-2-IMG_6966.JPG	12	2	1
r-1-2-IMG_6967.JPG	9	4	1
r-1-2-IMG_6968.JPG	7	2	1
r-1-2-IMG_6969.JPG	10	3	1
r-1-2-IMG_6970.JPG	4	2	1

Anexo D. Ficheros y código desarrollado para generación automática de imágenes con
métrica

r-1-2-IMG_6971.JPG	1	1	1
r-1-2-IMG_6972.JPG	3	1	1
r-1-2-IMG_6973.JPG	6	2	1
r-1-2-IMG_6974.JPG	12	7	2
r-1-2-IMG_6975.JPG	11	5	1
r-1-2-IMG_6976.JPG	14	7	1
r-1-2-IMG_6977.JPG	15	7	2
r-1-2-IMG_6978.JPG	9	5	2
r-11-12-IMG_7175.JPG	4	3	1
r-11-12-IMG_7176.JPG	10	4	2
r-11-12-IMG_7177.JPG	7	2	2
r-11-12-IMG_7178.JPG	5	4	3
r-11-12-IMG_7179.JPG	5	1	1
r-11-12-IMG_7180.JPG	13	6	3
r-11-12-IMG_7181.JPG	17	6	4
r-11-12-IMG_7182.JPG	22	14	5
r-11-12-IMG_7183.JPG	23	13	3
r-11-12-IMG_7184.JPG	24	11	4
r-11-12-IMG_7185.JPG	24	16	6
r-11-12-IMG_7186.JPG	18	9	6
r-11-12-IMG_7187.JPG	9	6	3
r-11-12-IMG_7188.JPG	16	10	5
r-11-12-IMG_7189.JPG	16	12	6
r-11-12-IMG_7190.JPG	24	15	8
r-11-12-IMG_7191.JPG	26	20	12
r-11-12-IMG_7192.JPG	25	16	9
r-11-12-IMG_7193.JPG	23	11	5
r-11-12-IMG_7194.JPG	18	12	6
r-11-12-IMG_7195.JPG	11	8	5
r-11-12-IMG_7196.JPG	9	8	3
r-11-12-IMG_7197.JPG	10	9	2
r-11-12-IMG_7198.JPG	10	6	2
r-11-12-IMG_7199.JPG	10	6	2
r-11-12-IMG_7200.JPG	9	6	1
r-11-12-IMG_7201.JPG	9	5	2
r-11-12-IMG_7202.JPG	6	6	1
r-11-12-IMG_7203.JPG	11	6	1
r-11-12-IMG_7204.JPG	8	3	1
r-11-12-IMG_7205.JPG	4	3	1
r-11-12-IMG_7206.JPG	6	4	1
r-11-12-IMG_7207.JPG	8	4	1
r-11-12-IMG_7208.JPG	13	5	2
r-11-12-IMG_7209.JPG	7	3	1

Corrección automática de la geometría de fotogramas capturados desde plataformas
aéreas no tripuladas

r-11-12-IMG_7210.JPG	10	6	2
r-13-14-IMG_7224.JPG	9	4	1
r-13-14-IMG_7225.JPG	18	6	2
r-13-14-IMG_7226.JPG	19	8	2
r-13-14-IMG_7227.JPG	10	6	1
r-13-14-IMG_7228.JPG	8	3	1
r-13-14-IMG_7229.JPG	8	3	1
r-13-14-IMG_7230.JPG	7	3	1
r-13-14-IMG_7231.JPG	6	1	1
r-13-14-IMG_7232.JPG	4	1	1
r-13-14-IMG_7233.JPG	6	4	2
r-13-14-IMG_7234.JPG	8	4	1
r-13-14-IMG_7235.JPG	12	6	1
r-13-14-IMG_7236.JPG	13	8	2
r-13-14-IMG_7237.JPG	11	8	4
r-13-14-IMG_7238.JPG	7	3	1
r-13-14-IMG_7239.JPG	16	7	5
r-13-14-IMG_7240.JPG	16	9	4
r-13-14-IMG_7241.JPG	20	9	7
r-13-14-IMG_7242.JPG	21	11	6
r-13-14-IMG_7243.JPG	15	10	5
r-13-14-IMG_7244.JPG	21	14	7
r-13-14-IMG_7245.JPG	25	18	8
r-13-14-IMG_7246.JPG	33	24	14
r-13-14-IMG_7247.JPG	13	9	5
r-13-14-IMG_7248.JPG	25	19	10
r-13-14-IMG_7249.JPG	21	16	7
r-13-14-IMG_7250.JPG	4	3	2
r-13-14-IMG_7251.JPG	4	3	2
r-15-16-IMG_7265.JPG	8	3	2
r-15-16-IMG_7266.JPG	21	15	4
r-15-16-IMG_7267.JPG	24	21	10
r-15-16-IMG_7268.JPG	26	22	8
r-15-16-IMG_7269.JPG	18	10	3
r-15-16-IMG_7270.JPG	25	8	4
r-15-16-IMG_7271.JPG	21	11	2
r-15-16-IMG_7272.JPG	15	9	3
r-15-16-IMG_7273.JPG	19	12	5
r-15-16-IMG_7274.JPG	13	10	7
r-15-16-IMG_7275.JPG	15	10	5
r-15-16-IMG_7276.JPG	9	6	1
r-15-16-IMG_7277.JPG	8	6	2
r-15-16-IMG_7278.JPG	10	7	3

Anexo D. Ficheros y código desarrollado para generación automática de imágenes con
métrica

r-15-16-IMG_7279.JPG	9	5	2
r-15-16-IMG_7280.JPG	15	7	2
r-15-16-IMG_7281.JPG	15	10	5
r-15-16-IMG_7282.JPG	14	10	4
r-15-16-IMG_7283.JPG	8	4	1
r-15-16-IMG_7284.JPG	7	6	2
r-15-16-IMG_7285.JPG	3	2	1
r-15-16-IMG_7286.JPG	7	5	3
r-15-16-IMG_7287.JPG	8	4	3
r-15-16-IMG_7288.JPG	8	4	1
r-15-16-IMG_7289.JPG	7	3	1
r-15-16-IMG_7290.JPG	4	1	1
r-15-16-IMG_7291.JPG	4	1	1
r-15-16-IMG_7292.JPG	3	1	1
r-15-16-IMG_7293.JPG	3	3	2
r-15-16-IMG_7294.JPG	7	5	2
r-15-16-IMG_7295.JPG	6	5	3
r-15-16-IMG_7296.JPG	8	3	2
r-15-16-IMG_7297.JPG	10	3	1
r-15-16-IMG_7298.JPG	4	1	1
r-17-18-IMG_7312.JPG	3	2	1
r-17-18-IMG_7313.JPG	10	4	1
r-17-18-IMG_7314.JPG	12	4	2
r-17-18-IMG_7315.JPG	8	5	4
r-17-18-IMG_7316.JPG	10	7	4
r-17-18-IMG_7317.JPG	10	5	4
r-17-18-IMG_7318.JPG	7	3	1
r-17-18-IMG_7319.JPG	5	1	1
r-17-18-IMG_7320.JPG	4	2	1
r-17-18-IMG_7321.JPG	5	4	2
r-17-18-IMG_7322.JPG	7	4	1
r-17-18-IMG_7323.JPG	7	5	3
r-17-18-IMG_7324.JPG	2	2	1
r-17-18-IMG_7325.JPG	11	6	2
r-17-18-IMG_7326.JPG	15	9	2
r-17-18-IMG_7327.JPG	13	7	2
r-17-18-IMG_7328.JPG	13	7	2
r-17-18-IMG_7329.JPG	5	2	1
r-17-18-IMG_7330.JPG	8	4	1
r-17-18-IMG_7331.JPG	4	2	1
r-19-20-IMG_7346.JPG	1	1	1
r-19-20-IMG_7347.JPG	3	3	1
r-19-20-IMG_7348.JPG	3	1	1

Corrección automática de la geometría de fotogramas capturados desde plataformas
aéreas no tripuladas

r-19-20-IMG_7349.JPG	10	6	2
r-19-20-IMG_7350.JPG	8	4	1
r-19-20-IMG_7351.JPG	9	4	1
r-19-20-IMG_7352.JPG	11	6	1
r-19-20-IMG_7353.JPG	10	6	3
r-19-20-IMG_7354.JPG	17	7	4
r-19-20-IMG_7355.JPG	8	2	1
r-19-20-IMG_7356.JPG	17	9	4
r-19-20-IMG_7357.JPG	5	4	1
r-19-20-IMG_7358.JPG	9	3	1
r-19-20-IMG_7359.JPG	7	3	1
r-19-20-IMG_7360.JPG	2	2	1
r-19-20-IMG_7361.JPG	5	3	1
r-19-20-IMG_7362.JPG	10	3	1
r-19-20-IMG_7363.JPG	4	1	1
r-19-20-IMG_7364.JPG	9	7	3
r-19-20-IMG_7365.JPG	10	5	1
r-19-20-IMG_7366.JPG	5	1	1
r-19-20-IMG_7367.JPG	2	1	1
r-19-20-IMG_7368.JPG	4	1	1
r-19-20-IMG_7369.JPG	3	1	1
r-19-20-IMG_7370.JPG	1	1	1
r-21-22-IMG_7383.JPG	2	1	1
r-21-22-IMG_7384.JPG	2	1	1
r-21-22-IMG_7385.JPG	5	1	1
r-21-22-IMG_7386.JPG	6	1	1
r-21-22-IMG_7387.JPG	5	3	3
r-21-22-IMG_7388.JPG	3	1	1
r-21-22-IMG_7389.JPG	1	1	1
r-21-22-IMG_7390.JPG	2	1	1
r-21-22-IMG_7391.JPG	1	1	1
r-23-24-IMG_7409.JPG	5	1	1
r-23-24-IMG_7410.JPG	5	1	1
r-23-24-IMG_7411.JPG	5	2	1
r-23-24-IMG_7412.JPG	4	2	1
r-23-24-IMG_7413.JPG	4	1	1
r-23-24-IMG_7414.JPG	5	1	1
r-23-24-IMG_7415.JPG	2	1	1
r-23-24-IMG_7416.JPG	1	1	1
r-23-24-IMG_7417.JPG	1	1	1
r-3-4-IMG_6991.JPG	1	1	1
r-3-4-IMG_6992.JPG	4	2	1
r-3-4-IMG_6993.JPG	9	6	2

Anexo D. Ficheros y código desarrollado para generación automática de imágenes con
métrica

r-3-4-IMG_6994.JPG	8	6	2
r-3-4-IMG_6995.JPG	2	1	1
r-3-4-IMG_6996.JPG	9	5	1
r-3-4-IMG_6997.JPG	6	4	1
r-3-4-IMG_6998.JPG	16	4	1
r-3-4-IMG_6999.JPG	16	6	2
r-3-4-IMG_7000.JPG	5	1	1
r-3-4-IMG_7001.JPG	8	1	1
r-3-4-IMG_7002.JPG	10	3	1
r-3-4-IMG_7003.JPG	10	3	1
r-3-4-IMG_7004.JPG	12	5	2
r-3-4-IMG_7005.JPG	12	4	1
r-3-4-IMG_7006.JPG	4	2	1
r-3-4-IMG_7007.JPG	5	3	1
r-3-4-IMG_7009.JPG	9	7	1
r-3-4-IMG_7010.JPG	14	8	3
r-3-4-IMG_7011.JPG	14	9	2
r-3-4-IMG_7012.JPG	5	3	2
r-3-4-IMG_7013.JPG	5	2	1
r-3-4-IMG_7014.JPG	6	4	1
r-3-4-IMG_7015.JPG	11	6	1
r-3-4-IMG_7016.JPG	9	5	2
r-3-4-IMG_7017.JPG	6	5	2
r-3-4-IMG_7018.JPG	3	3	4
r-3-4-IMG_7019.JPG	6	2	2
r-3-4-IMG_7020.JPG	5	1	1
r-3-4-IMG_7021.JPG	8	6	1
r-3-4-IMG_7022.JPG	8	3	4
r-3-4-IMG_7023.JPG	11	6	2
r-3-4-IMG_7024.JPG	17	10	3
r-3-4-IMG_7025.JPG	10	7	2
r-3-4-IMG_7026.JPG	6	5	1
r-5-6-IMG_7039.JPG	5	1	1
r-5-6-IMG_7040.JPG	7	3	1
r-5-6-IMG_7041.JPG	16	8	1
r-5-6-IMG_7042.JPG	3	2	3
r-5-6-IMG_7043.JPG	8	7	1
r-5-6-IMG_7044.JPG	1	1	5
r-5-6-IMG_7045.JPG	9	5	1
r-5-6-IMG_7046.JPG	6	6	3
r-5-6-IMG_7047.JPG	16	12	3
r-5-6-IMG_7048.JPG	25	20	5
r-5-6-IMG_7049.JPG	19	15	10

Corrección automática de la geometría de fotogramas capturados desde plataformas
aéreas no tripuladas

r-5-6-IMG_7050.JPG	14	11	8
r-5-6-IMG_7051.JPG	16	9	5
r-5-6-IMG_7052.JPG	11	6	2
r-5-6-IMG_7053.JPG	10	4	3
r-5-6-IMG_7054.JPG	10	3	2
r-5-6-IMG_7055.JPG	7	1	1
r-5-6-IMG_7056.JPG	4	3	1
r-5-6-IMG_7057.JPG	11	6	2
r-5-6-IMG_7058.JPG	17	7	3
r-5-6-IMG_7059.JPG	21	9	4
r-5-6-IMG_7060.JPG	16	8	3
r-5-6-IMG_7061.JPG	5	1	1
r-5-6-IMG_7062.JPG	13	5	1
r-5-6-IMG_7063.JPG	8	2	1
r-5-6-IMG_7064.JPG	7	4	1
r-5-6-IMG_7065.JPG	7	1	3
r-5-6-IMG_7066.JPG	8	2	1
r-5-6-IMG_7067.JPG	2	1	1
r-7-8-IMG_7082.JPG	3	1	1
r-7-8-IMG_7083.JPG	7	3	1
r-7-8-IMG_7084.JPG	4	3	1
r-7-8-IMG_7085.JPG	9	5	1
r-7-8-IMG_7086.JPG	15	8	2
r-7-8-IMG_7087.JPG	15	5	2
r-7-8-IMG_7088.JPG	11	3	2
r-7-8-IMG_7089.JPG	16	8	1
r-7-8-IMG_7090.JPG	17	10	1
r-7-8-IMG_7091.JPG	29	14	3
r-7-8-IMG_7092.JPG	23	11	3
r-7-8-IMG_7093.JPG	8	5	6
r-7-8-IMG_7094.JPG	16	9	2
r-7-8-IMG_7095.JPG	17	9	3
r-7-8-IMG_7096.JPG	16	6	1
r-7-8-IMG_7097.JPG	13	3	1
r-7-8-IMG_7098.JPG	14	6	1
r-7-8-IMG_7099.JPG	11	3	1
r-7-8-IMG_7100.JPG	16	8	1
r-7-8-IMG_7101.JPG	13	5	1
r-7-8-IMG_7102.JPG	16	8	1
r-7-8-IMG_7103.JPG	17	8	4
r-7-8-IMG_7104.JPG	14	7	5
r-7-8-IMG_7105.JPG	15	9	3
r-7-8-IMG_7106.JPG	13	7	6

Anexo D. Ficheros y código desarrollado para generación automática de imágenes con
métrica

r-7-8-IMG_7107.JPG	10	4	2
r-7-8-IMG_7108.JPG	8	2	1
r-7-8-IMG_7109.JPG	6	2	1
r-7-8-IMG_7110.JPG	12	5	1
r-7-8-IMG_7111.JPG	11	5	4
r-7-8-IMG_7112.JPG	9	3	3
r-7-8-IMG_7113.JPG	13	6	2
r-7-8-IMG_7114.JPG	12	4	2
r-7-8-IMG_7115.JPG	5	1	1
r-9-10-IMG_7130.JPG	9	5	1
r-9-10-IMG_7131.JPG	17	9	2
r-9-10-IMG_7132.JPG	22	13	3
r-9-10-IMG_7133.JPG	15	7	4
r-9-10-IMG_7134.JPG	10	5	2
r-9-10-IMG_7135.JPG	8	4	1
r-9-10-IMG_7136.JPG	5	1	2
r-9-10-IMG_7137.JPG	10	5	1
r-9-10-IMG_7138.JPG	10	6	2
r-9-10-IMG_7139.JPG	12	6	3
r-9-10-IMG_7140.JPG	5	4	1
r-9-10-IMG_7141.JPG	13	8	2
r-9-10-IMG_7142.JPG	13	7	3
r-9-10-IMG_7143.JPG	16	10	5
r-9-10-IMG_7144.JPG	17	12	6
r-9-10-IMG_7145.JPG	12	8	9
r-9-10-IMG_7146.JPG	12	8	6
r-9-10-IMG_7147.JPG	10	5	4
r-9-10-IMG_7148.JPG	18	9	3
r-9-10-IMG_7149.JPG	12	6	4
r-9-10-IMG_7150.JPG	18	6	3
r-9-10-IMG_7151.JPG	19	7	1
r-9-10-IMG_7152.JPG	25	13	3
r-9-10-IMG_7153.JPG	19	13	4
r-9-10-IMG_7154.JPG	7	3	4
r-9-10-IMG_7155.JPG	4	1	1
r-9-10-IMG_7156.JPG	7	1	1
r-9-10-IMG_7157.JPG	10	2	1
r-9-10-IMG_7158.JPG	6	2	1
r-9-10-IMG_7159.JPG	3	2	1

D.5. Tests NSSDA de cada ensayo en la finca de Santa Clotilde

Se amplía información sobre el resultado de aplicar el test NSSDA a cada uno de los ensayos realizados en el apartado 4.3.6. Para cada test, se aprecian las coordenadas de los puntos según una fuente de mayor precisión (JA), y las coordenadas de los puntos identificados sobre la ortofoto generada (ORTO).

Tabla D.3: Test NSSDA. Ensayo1, MDT05m

Muestras	79.0000		RMSEr	0.6405							SumX_diff2	SumY_diff2	SumZ_diff2
RMSEx	0.2821		EXACTr	1.1085	siRMSEx=RMSEy						6.2880	26.1185	83.0206
RMSEy	0.5750		EXACTr	1.0490	siRMSEx!=RMSEy								
RMSEz	1.0251		EXACTr_z	2.0093									
ID	X_JA	Y_JA	Z_JA	X_ORTO	Y_ORTO	Z_ORTO	X_dif	Y_dif	Z_dif	X_diff2	Y_diff2	Z_diff2	
P1	387414.3261	4230464.8536	754.7910	387413.9917	4230464.6809	754.2042	-0.3345	-0.1726	-0.5869	0.1119	0.0298	0.3444	
P10	387488.7415	4229935.2042	737.3330	387488.8075	4229935.2419	736.1500	0.0660	0.0377	-1.1830	0.0043	0.0014	1.3995	
P11	387696.2428	4229995.6397	743.1340	387696.2523	4229995.8093	742.8483	0.0094	0.1696	-0.2856	0.0001	0.0288	0.0816	
P12	387305.8457	4229911.5717	739.0840	387305.1202	4229911.8732	737.9749	-0.7255	0.3015	-1.1091	0.5263	0.0909	1.2300	
P13	387113.7813	4229846.0229	736.0320	387113.6588	4229846.7578	736.0000	-0.1225	0.7349	-0.0320	0.0150	0.5400	0.0010	
P14	387818.6352	4229603.3380	721.4860	387818.3620	4229603.6772	720.1710	-0.2732	0.3392	-1.3151	0.0747	0.1150	1.7294	
P15	387698.1018	4229683.0148	724.3970	387698.1112	4229683.2409	722.6085	0.0094	0.2261	-1.7885	0.0001	0.0511	3.1988	
P16	387707.6477	4229872.4063	736.2770	387707.4687	4229872.8020	736.5353	-0.1790	0.3957	0.2583	0.0320	0.1566	0.0667	
P17	387558.2219	4229747.3545	729.9150	387558.1748	4229747.8067	729.8928	-0.0471	0.4522	-0.0222	0.0022	0.2045	0.0005	
P18	387312.3821	4229767.1464	737.8590	387312.2031	4229767.4290	737.1647	-0.1790	0.2826	-0.6943	0.0320	0.0799	0.4821	
P19	387164.2533	4229644.4100	743.0040	387164.1119	4229644.9376	742.4745	-0.1413	0.5276	-0.5295	0.0200	0.2784	0.2804	
P2	387412.7230	4230274.0240	745.9830	387412.7136	4230274.0617	745.8618	-0.0094	0.0377	-0.1212	0.0001	0.0014	0.0147	
P20	386991.8287	4229625.8917	726.3850	386992.1396	4229626.1743	725.9794	0.3109	0.2826	-0.4056	0.0967	0.0799	0.1645	
P21	386832.1961	4229620.1539	716.9870	386832.2055	4229620.4554	716.5663	0.0094	0.3015	-0.4207	0.0001	0.0909	0.1770	
P22	387398.9215	4229370.9259	723.4430	387398.4410	4229371.3216	722.9025	-0.4805	0.3957	-0.5405	0.2309	0.1566	0.2922	
P23	387223.4004	4229321.6689	723.0190	387223.1271	4229322.0646	722.9281	-0.2732	0.3957	-0.0909	0.0747	0.1566	0.0083	
P24	387016.7497	4229315.3796	718.4390	387016.2503	4229315.4738	717.1613	-0.4993	0.0942	-1.2777	0.2493	0.0089	1.6325	
P25	386785.0624	4229301.9567	703.9890	386785.3922	4229302.1263	703.0628	0.1696	0.1696	-0.9262	0.1087	0.0288	0.8578	
P26	387785.0601	4229464.7546	708.1200	387785.0696	4229464.8488	706.7980	0.0094	0.0942	-1.3220	0.0001	0.0089	1.7476	
P27	387642.7353	4229524.5840	721.0910	387642.7212	4229524.6782	720.6326	-0.0141	0.0942	-0.4584	0.0002	0.0089	0.2102	
P28	387482.5226	4229588.0645	727.3370	387482.1740	4229588.3801	726.1788	-0.3486	0.3156	-1.1582	0.1215	0.0996	1.3413	
P29	387277.2530	4229537.4710	732.2870	387277.1753	4229537.7725	731.1683	-0.0777	0.3015	-1.1187	0.0060	0.0909	1.2515	
P3	387251.4415	4230259.7542	742.4840	387251.4320	4230259.7919	741.9252	-0.0094	0.0377	-0.5588	0.0001	0.0014	0.3122	
P30	387088.3070	4229448.6301	727.0800	387088.3800	4229448.9458	726.3906	0.0730	0.3156	-0.6895	0.0053	0.0996	0.4754	
P31	386949.5727	4229461.1035	728.5370	386949.2311	4229461.2354	727.8267	-0.3415	0.1319	-0.7103	0.1166	0.0174	0.5045	
P32	386816.4704	4229491.1414	711.9720	386816.5670	4229491.6643	711.9431	0.0966	0.5229	-0.0289	0.0093	0.2734	0.0008	
P33	387848.3724	4229334.8521	716.3040	387848.9071	4229335.0123	715.0634	0.5347	0.1602	-1.2407	0.2859	0.0257	1.5393	
P34	387695.9787	4229358.0940	700.0720	387696.1223	4229358.2212	698.5236	0.1437	0.1272	-1.5485	0.0206	0.0162	2.3977	
P35	387549.6092	4229412.0050	710.7660	387549.4184	4229412.3913	710.1415	-0.1908	0.3863	-0.6245	0.0364	0.1492	0.3900	
P36	387302.5914	4229220.4318	707.0700	387302.2640	4229220.6861	706.2136	-0.3274	0.2544	-0.8564	0.1072	0.0647	0.7334	
P37	387113.0526	4229145.3165	703.2130	387113.4177	4229145.4107	702.4678	0.3651	0.0942	-0.7452	0.1333	0.0089	0.5554	
P38	386905.4851	4229131.0384	716.8290	386905.2284	4229131.6602	716.8215	-0.2567	0.6218	-0.0074	0.0659	0.3867	0.0001	
P39	386738.8214	4229155.9806	697.1330	386739.0993	4229156.0089	696.4713	0.2779	0.0283	-0.6617	0.0772	0.0008	0.4378	
P4	387104.2084	4230190.2859	735.8790	387104.4628	4230190.7570	735.1583	0.2544	0.4711	-0.7208	0.0647	0.2219	0.5195	
P40	387795.0903	4229133.2385	719.7290	387794.9442	4229133.7661	719.4042	-0.1460	0.5276	-0.3248	0.0213	0.2784	0.1055	
P41	387637.5571	4229199.8542	706.7170	387637.2509	4229200.2593	705.8932	-0.3062	0.4051	-0.8238	0.0938	0.1641	0.6786	
P42	387481.8465	4229264.5029	704.5620	387481.6675	4229263.9376	703.7037	-0.1790	-0.5653	-0.8583	0.0320	0.3196	0.7367	
P43	387845.5498	4228893.8751	727.8060	387845.4273	4228894.1389	727.2317	-0.1225	0.2638	-0.5743	0.0150	0.0696	0.3299	
P44	387578.7997	4228853.0308	706.7000	387578.8656	4228851.6364	705.6262	0.0660	-1.3944	-1.0738	0.0043	1.9443	1.1530	
P45	387430.6788	4228839.9592	718.5410	387430.4810	4228840.8071	717.3902	-0.1979	0.8479	-1.1508	0.0391	0.7190	1.3244	
P46	387217.2358	4228825.2402	714.4850	387216.9248	4228826.5404	713.7206	-0.3109	1.3002	-0.7644	0.0967	1.6904	0.5842	
P47	387049.6328	4228839.6011	695.8250	387049.5857	4228841.6267	695.5559	-0.0471	2.0256	-0.2692	0.0022	4.1031	0.0724	
P48	386878.5847	4228800.5703	669.6310	386878.8956	4228802.1720	667.2673	0.3109	1.6016	-2.3637	0.0967	2.5653	5.5868	
P49	386720.6740	4228788.0331	665.9200	386720.9095	4228787.2982	662.5602	0.2355	-0.7349	-3.3598	0.0555	0.5400	11.2883	
P5	387032.3739	4230019.1332	730.3670	387032.4964	4230019.3593	729.5051	0.1225	0.2255	-0.8619	0.0150	0.0511	0.7428	
P50	387760.2616	4229049.1240	722.4910	387760.1391	4229049.6139	721.9677	-0.1225	0.4899	-0.5234	0.0150	0.2400	0.2739	

P51	387577.4558	4229043.6051	715.8920	387576.9941	4229043.2282	714.4606	-0.4617	-0.3769	-1.4314	0.2131	0.1420	2.0489
P52	387405.1670	4229033.6591	711.4890	387404.9692	4229033.7534	710.4897	-0.1979	0.0942	-0.9993	0.0391	0.0089	0.9986
P53	387211.9355	4229012.5091	680.0850	387211.4550	4229012.2830	679.8552	-0.4805	-0.2261	-0.2298	0.2309	0.0511	0.0528
P54	387019.4590	4229015.5692	674.0190	387019.3554	4229015.6823	673.0349	-0.1036	0.1131	-0.9841	0.0107	0.0128	0.9685
P55	386842.5300	4228970.9503	692.0360	386842.4829	4228970.9692	691.4247	-0.0471	0.0188	-0.6113	0.0022	0.0004	0.3737
P56	386713.5433	4229006.8001	701.6820	386714.0238	4229006.6870	700.5452	0.4805	-0.1131	-1.1368	0.2309	0.0128	1.2923
P57	387655.2616	4227629.3342	734.6990	387654.9507	4227629.5980	734.3267	-0.3109	0.2638	-0.3723	0.0967	0.0696	0.1386
P58	387720.4979	4227771.0740	740.1940	387719.9420	4227771.1116	739.4214	-0.5559	0.0377	-0.7726	0.3090	0.0014	0.5969
P59	387490.4578	4227855.4441	728.9210	387490.7869	4227856.6525	728.1929	0.3291	1.2084	-0.7281	0.1083	1.4602	0.5301
P6	387429.5421	4230139.6278	742.4080	387428.9674	4230139.6655	742.0168	-0.5747	0.0377	-0.3912	0.3303	0.0014	0.1531
P60	387715.1131	4227998.9958	741.9510	387714.4226	4228000.0639	742.0053	-0.6905	1.0681	0.0543	0.4768	1.1409	0.0030
P61	387560.3324	4228006.2053	740.0610	387560.3270	4228006.2161	739.4992	-0.0054	0.0108	-0.5618	0.0000	0.0001	0.3156
P62	387370.0020	4228036.1917	732.3780	387370.1800	4228036.6880	731.9998	0.1780	0.4963	-0.3782	0.0317	0.2463	0.1430
P63	387216.7972	4228082.3643	717.2390	387216.8026	4228082.4614	717.2147	0.0054	0.0971	-0.0243	0.0000	0.0094	0.0006
P64	387690.4784	4228228.0592	737.8190	387690.7643	4228228.0269	738.8583	0.2859	-0.0324	1.0394	0.0817	0.0010	1.0803
P65	387510.0380	4228214.2390	738.5110	387509.7899	4228214.6490	737.6224	-0.2481	0.4100	-0.8886	0.0616	0.1681	0.7895
P66	387310.1306	4228238.2192	735.4810	387310.1198	4228237.7230	733.9987	-0.0108	-0.4963	-1.4824	0.0001	0.2463	2.1974
P67	387108.0476	4228282.7355	716.1120	387108.4899	4228281.6350	713.5909	0.4423	-1.1005	-2.5211	0.1957	1.2111	6.3557
P68	387619.9088	4228407.4685	732.8970	387619.4665	4228407.4253	731.7061	-0.4423	-0.0432	-1.1908	0.1957	0.0019	1.4181
P69	387410.9859	4228421.6936	734.1900	387411.0182	4228421.8230	732.6376	0.0324	0.1295	-1.5524	0.0010	0.0168	2.4099
P7	387604.1957	4230148.8111	750.0750	387603.9601	4230148.9430	749.4816	-0.2355	0.1319	-0.5934	0.0555	0.0174	0.3521
P70	387204.5462	4228442.8558	730.3700	387204.6002	4228443.9563	729.4746	0.0539	1.1005	-0.8954	0.0029	1.2111	0.8017
P71	387055.7089	4228436.1886	722.1010	387055.9570	4228436.7065	722.0591	0.2481	0.5179	-0.0419	0.0616	0.2682	0.0018
P72	386901.5269	4228451.7094	708.0300	386901.5161	4228452.6157	706.9995	-0.0108	0.9063	-1.0306	0.0001	0.8213	1.0621
P73	387744.2594	4228582.1693	732.1210	387744.4212	4228582.3203	730.9775	0.1618	0.1510	-1.1434	0.0262	0.0228	1.3074
P74	387497.1239	4228577.3196	732.0580	387497.0268	4228577.1038	731.0355	-0.0971	-0.2158	-1.0225	0.0094	0.0466	1.0454
P75	387308.4319	4228555.0507	733.2590	387308.5505	4228554.7486	732.4042	0.1187	-0.3021	-0.8548	0.0141	0.0913	0.7307
P76	387127.9546	4228618.2944	727.0600	387128.3107	4228618.9417	726.0492	0.3560	0.6473	-1.0108	0.1268	0.4190	1.0217
P77	386924.4499	4228610.7497	720.6500	386924.5902	4228611.3754	719.9536	0.1403	0.6258	-0.6965	0.0197	0.3916	0.4851
P78	386772.7478	4228621.9948	675.7360	386772.8880	4228623.1816	673.2523	0.1403	1.1868	-2.4837	0.0197	1.4085	6.1688
P79	386924.7398	4229751.9000	728.0090	386925.0131	4229752.4841	727.6551	0.2732	0.5841	-0.3539	0.0747	0.3412	0.1252
P8	387145.2424	4230058.8410	741.9480	387145.3460	4230058.9729	741.4522	0.1036	0.1319	-0.4958	0.0107	0.0174	0.2458
P9	387306.6634	4230051.7295	744.8650	387306.2960	4230051.7672	744.1224	-0.3674	0.0377	-0.7426	0.1350	0.0014	0.5515

Corrección automática de la geometría de fotogramas capturados desde plataformas aéreas no tripuladas

Tabla D.4: Test NSSDA. Ensayo1, MDT10m

Muestras	79.0000		RMSEr	0.6405								
RMSEx	0.2821		EXACTr	1.1085	siRMSEx=RMSEy							
RMSEy	0.5750		EXACTr	1.0490	siRMSEx!=RMSEy							
RMSEz	0.9190		EXACTr _z	1.8012								
ID	X_JA	Y_JA	Z_JA	X_ORTO	Y_ORTO	Z_ORTO	X_dif	Y_dif	Z_dif	SumX_diff2	SumY_diff2	SumZ_diff2
P1	387414.3261	4230464.8536	754.1644	387413.9917	4230464.6809	754.2042	-0.3345	-0.1726	0.0398	0.1119	0.0298	0.0016
P10	387488.7415	4229935.2042	737.5070	387488.8075	4229935.2419	736.1500	0.0660	0.0377	-1.3570	0.0043	0.0014	1.8414
P11	387696.2428	4229995.6397	743.0800	387696.2523	4229995.8093	742.8483	0.0094	0.1696	-0.2317	0.0000	0.0288	0.0537
P12	387305.8457	4229911.5717	739.1705	387305.1202	4229911.8732	737.9749	-0.7255	0.3015	-1.1956	0.5263	0.0909	1.4294
P13	387113.7813	4229846.0229	736.0010	387113.6588	4229846.7578	736.0000	-0.1225	0.7349	-0.0010	0.0150	0.5400	0.0000
P14	387818.6352	4229603.3380	720.9655	387818.3620	4229603.6772	720.1710	-0.2732	0.3392	-0.7946	0.0747	0.1150	0.6313
P15	387698.1018	4229683.0148	724.1770	387698.1112	4229683.2409	722.6085	0.0094	0.2261	-1.5685	0.0000	0.0511	2.4603
P16	387707.6477	4229872.4063	736.7600	387707.4687	4229872.8020	736.5353	-0.1790	0.3957	-0.2247	0.0320	0.1566	0.0505
P17	387558.2219	4229747.3545	730.2205	387558.1748	4229747.8067	729.8928	-0.0471	0.4522	-0.3277	0.0022	0.2045	0.1074
P18	387312.3821	4229767.1464	738.0200	387312.2031	4229767.4290	737.1647	-0.1790	0.2826	-0.8554	0.0320	0.0799	0.7316
P19	387164.2533	4229644.4100	742.7610	387164.1119	4229644.9376	742.4745	-0.1413	0.5276	-0.2865	0.0200	0.2784	0.0821
P2	387412.7230	4230274.0240	745.9970	387412.7136	4230274.0617	745.8618	-0.0094	0.0377	-0.1352	0.0000	0.0014	0.0183
P20	386991.8287	4229625.8917	726.5600	386992.1396	4229626.1743	725.9794	0.3109	0.2826	-0.5806	0.0967	0.0799	0.3371
P21	386832.1961	4229620.1539	717.0830	386832.2055	4229620.4554	716.5663	0.0094	0.3015	-0.5167	0.0000	0.0909	0.2670
P22	387398.9215	4229370.9259	723.5435	387398.4410	4229371.3216	722.9025	-0.4805	0.3957	-0.6411	0.2309	0.1566	0.4109
P23	387223.4004	4229321.6689	723.4865	387223.1271	4229322.0646	722.9281	-0.2732	0.3957	-0.5584	0.0747	0.1566	0.3118
P24	387016.7497	4229315.3796	718.2120	387016.2503	4229315.4738	717.1613	-0.4993	0.0942	-1.0507	0.2493	0.0089	1.1039
P25	386785.0624	4229301.9567	703.6410	386785.3922	4229302.1263	703.0628	0.3298	0.1696	-0.5782	0.1087	0.0288	0.3343
P26	387785.0601	4229464.7546	707.6735	387785.0696	4229464.8488	706.7980	0.0094	0.0942	-0.8755	0.0000	0.0089	0.7665
P27	387642.7353	4229524.5840	721.7755	387642.7212	4229524.6782	720.6326	-0.0141	0.0942	-1.1429	0.0002	0.0089	1.3063
P28	387482.5226	4229588.0645	727.0625	387482.1740	4229588.3801	726.1788	-0.3486	0.3156	-0.8837	0.1215	0.0996	0.7809
P29	387277.2530	4229537.4710	732.1900	387277.1753	4229537.7725	731.1683	-0.0777	0.3015	-1.0217	0.0060	0.0909	1.0439
P3	387251.4415	4230259.7542	742.3765	387251.4320	4230259.7919	741.9252	-0.0094	0.0377	-0.4513	0.0000	0.0014	0.2037
P30	387088.3070	4229448.6301	726.8775	387088.3800	4229448.9458	726.3906	0.0730	0.3156	-0.4869	0.0053	0.0996	0.2371
P31	386949.5727	4229461.1035	728.3580	386949.2311	4229461.2354	727.8267	-0.3415	0.1319	-0.5313	0.1166	0.0174	0.2822
P32	386816.4704	4229491.1414	712.3500	386816.5670	4229491.6643	711.9431	0.0966	0.5229	-0.4069	0.0093	0.2734	0.1656
P33	387848.3724	4229334.8521	715.9420	387848.9071	4229335.0123	715.0634	0.5347	0.1602	-0.8787	0.2859	0.0257	0.7721
P34	387695.9787	4229358.0940	700.0280	387696.1223	4229358.2212	698.5236	0.1437	0.1272	-1.5045	0.0206	0.0162	2.2634
P35	387549.6092	4229412.0050	711.4155	387549.4184	4229412.3913	710.1415	-0.1908	0.3863	-1.2741	0.0364	0.1492	1.6232
P36	387302.5914	4229220.4318	707.5570	387302.2640	4229220.6861	706.2136	-0.3274	0.2544	-1.3434	0.1072	0.0647	1.8047
P37	387113.0526	4229145.3165	703.1880	387113.4177	4229145.4107	702.4678	0.3651	0.0942	-0.7202	0.1333	0.0089	0.5187
P38	386905.4851	4229131.0384	716.8790	386905.2284	4229131.6602	716.8215	-0.2567	0.6218	-0.0575	0.0659	0.3867	0.0033
P39	386738.8214	4229155.9806	697.2345	386739.0993	4229156.0089	696.4713	0.2779	0.0283	-0.7632	0.0772	0.0008	0.5825
P4	387104.2084	4230190.2859	735.7955	387104.4628	4230190.7570	735.1583	0.2544	0.4711	-0.6372	0.0647	0.2219	0.4060
P40	387795.0903	4229133.2385	719.7990	387794.9442	4229133.7661	719.4042	-0.1460	0.5276	-0.3948	0.0213	0.2784	0.1558
P41	387637.5571	4229199.8542	706.2470	387637.2509	4229200.2593	705.8932	-0.3062	0.4051	-0.3538	0.0938	0.1641	0.1252
P42	387481.8465	4229264.5029	704.8325	387481.6675	4229263.9376	703.7037	-0.1790	-0.5653	-1.1289	0.0320	0.3196	1.2743
P43	387845.5498	4228893.8751	727.5760	387845.4273	4228894.1389	727.2317	-0.1225	0.2638	-0.3443	0.0150	0.0696	0.1185
P44	387578.7997	4228853.0308	706.7165	387578.8656	4228851.6364	705.6262	0.0660	-1.3944	-1.0903	0.0043	1.9443	1.1887
P45	387430.6788	4228839.9592	718.5745	387430.4810	4228840.8071	717.3902	-0.1979	0.8479	-1.1843	0.0391	0.7190	1.4026
P46	387217.2358	4228825.2402	714.2220	387216.9248	4228826.5404	713.7206	-0.3109	1.3002	-0.5013	0.0967	1.6904	0.2513
P47	387049.6328	4228839.6011	695.9880	387049.5857	4228841.6267	695.5559	-0.0471	2.0256	-0.4321	0.0022	4.1031	0.1867
P48	386878.5847	4228800.5703	669.0695	386878.8956	4228802.1720	667.2673	0.3109	1.6016	-1.8022	0.0967	2.5653	3.2479
P49	386720.6740	4228788.0331	665.4085	386720.9095	4228787.2982	662.5602	0.2355	-0.7349	-2.8483	0.0555	0.5400	8.1130
P5	387032.3739	4230019.1332	730.4485	387032.4964	4230019.3593	729.5051	0.1225	0.2261	-0.9434	0.0150	0.0511	0.8899
P50	387760.2616	4229049.1240	722.5205	387760.1391	4229049.6139	721.9677	-0.1225	0.4899	-0.5529	0.0150	0.2400	0.3057

P51	387577.4558	4229043.6051	715.1860	387576.9941	4229043.2282	714.4606	-0.4617	-0.3769	-0.7253	0.2131	0.1420	0.5261
P52	387405.1670	4229033.6591	711.0410	387404.9692	4229033.7534	710.4897	-0.1979	0.0942	-0.5513	0.0391	0.0089	0.3040
P53	387211.9355	4229012.5091	680.1065	387211.4550	4229012.2830	679.8552	-0.4805	-0.2261	-0.2513	0.2309	0.0511	0.0631
P54	387019.4590	4229015.5692	674.2800	387019.3554	4229015.6823	673.0349	-0.1036	0.1131	-1.2452	0.0107	0.0128	1.5505
P55	386842.5300	4228970.9503	692.6110	386842.4829	4228970.9692	691.4247	-0.0471	0.0188	-1.1863	0.0022	0.0004	1.4074
P56	386713.5433	4229006.8001	701.0350	386714.0238	4229006.6870	700.5452	0.4805	-0.1131	-0.4897	0.2309	0.0128	0.2398
P57	387655.2616	4227629.3342	734.7500	387654.9507	4227629.5980	734.3267	-0.3109	0.2638	-0.4233	0.0967	0.0696	0.1792
P58	387720.4979	4227771.0740	740.1185	387719.9420	4227771.1116	739.4214	-0.5559	0.0377	-0.6971	0.3090	0.0014	0.4860
P59	387490.4578	4227855.4441	728.9125	387490.7869	4227856.6525	728.1929	0.3291	1.2084	-0.7196	0.1083	1.4602	0.5178
P6	387429.5421	4230139.6278	742.3990	387428.9674	4230139.6655	742.0168	-0.5747	0.0377	-0.3822	0.3303	0.0014	0.1461
P60	387715.1131	4227998.9958	741.8990	387714.4226	4228000.0639	742.0053	-0.6905	1.0681	0.1063	0.4768	1.1409	0.0113
P61	387560.3324	4228006.2053	740.1650	387560.3270	4228006.2161	739.4992	-0.0054	0.0108	-0.6658	0.0000	0.0001	0.4432
P62	387370.0020	4228036.1917	732.5195	387370.1800	4228036.6880	731.9998	0.1780	0.4963	-0.5197	0.0317	0.2463	0.2700
P63	387216.7972	4228082.3643	718.0640	387216.8026	4228082.4614	717.2147	0.0054	0.0971	-0.8493	0.0000	0.0094	0.7213
P64	387690.4784	4228228.0592	737.9510	387690.7643	4228228.0269	738.8583	0.2859	-0.0324	0.9074	0.0817	0.0010	0.8233
P65	387510.0380	4228214.2390	738.5445	387509.7899	4228214.6490	737.6224	-0.2481	0.4100	-0.9221	0.0616	0.1681	0.8502
P66	387310.1306	4228238.2192	735.4015	387310.1198	4228237.7230	733.9987	-0.0108	-0.4963	-1.4028	0.0001	0.2463	1.9679
P67	387108.0476	4228282.7355	715.5165	387108.4899	4228281.6350	713.5909	0.4423	-1.1005	-1.9255	0.1957	1.2111	3.7077
P68	387619.9088	4228407.4685	732.5940	387619.4665	4228407.4253	731.7061	-0.4423	-0.0432	-0.8879	0.1957	0.0019	0.7883
P69	387410.9859	4228421.6936	734.0695	387411.0182	4228421.8230	732.6376	0.0324	0.1295	-1.4319	0.0010	0.0168	2.0503
P7	387604.1957	4230148.8111	749.9805	387603.9601	4230148.9430	749.4816	-0.2355	0.1319	-0.4989	0.0555	0.0174	0.2489
P70	387204.5462	4228442.8558	730.3475	387204.6002	4228443.9563	729.4746	0.0539	1.1005	-0.8729	0.0029	1.2111	0.7619
P71	387055.7089	4228436.1886	722.4075	387055.9570	4228436.7065	722.0591	0.2481	0.5179	-0.3483	0.0616	0.2682	0.1213
P72	386901.5269	4228451.7094	708.2460	386901.5161	4228452.6157	706.9995	-0.0108	0.9063	-1.2465	0.0001	0.8213	1.5538
P73	387744.2594	4228582.1693	732.0695	387744.4212	4228582.3203	730.9775	0.1618	0.1510	-1.0920	0.0262	0.0228	1.1924
P74	387497.1239	4228577.3196	731.7600	387497.0268	4228577.1038	731.0355	-0.0971	-0.2158	-0.7245	0.0094	0.0466	0.5249
P75	387308.4319	4228555.0507	733.3535	387308.5505	4228554.7486	732.4042	0.1187	-0.3021	-0.9494	0.0141	0.0913	0.9013
P76	387127.9546	4228618.2944	726.9555	387128.3107	4228618.9417	726.0492	0.3560	0.6473	-0.9063	0.1268	0.4190	0.8214
P77	386924.4499	4228610.7497	720.5870	386924.5902	4228611.3754	719.9536	0.1403	0.6258	-0.6334	0.0197	0.3916	0.4012
P78	386772.7478	4228621.9948	674.7315	386772.8880	4228623.1816	673.2523	0.1403	1.1868	-1.4792	0.0197	1.4085	2.1880
P79	386924.7398	4229751.9000	728.1145	386925.0131	4229752.4841	727.6551	0.2732	0.5841	-0.4594	0.0747	0.3412	0.2111
P8	387145.2424	4230058.8410	741.8125	387145.3460	4230058.9729	741.4522	0.1036	0.1319	-0.3603	0.0107	0.0174	0.1298
P9	387306.6634	4230051.7295	744.7685	387306.2960	4230051.7672	744.1224	-0.3674	0.0377	-0.6461	0.1350	0.0014	0.4175

Corrección automática de la geometría de fotogramas capturados desde plataformas aéreas no tripuladas

Tabla D.5: Test NSSDA. Ensayo2, MDT05m

[illegible]

P50	387760.2616	4229049.1240	722.4910	387760.2346	4229049.3613	722.0349	-0.0270	0.2374	-0.4562	0.0007	0.0563	0.2081
P51	387577.4558	4229043.6051	715.8920	387577.0835	4229043.1195	714.4812	-0.3722	-0.4855	-1.4108	0.1385	0.2357	1.9904
P52	387405.1670	4229033.6591	711.4890	387405.0106	4229033.4865	710.5289	-0.1564	-0.1726	-0.9601	0.0245	0.0298	0.9219
P53	387211.9355	4229012.5091	680.0850	387211.5093	4229011.7862	680.7645	-0.4262	-0.7229	0.6795	0.1816	0.5225	0.4617
P54	387019.4590	4229015.5692	674.0190	387019.2594	4229015.5045	672.8446	-0.1996	-0.0647	-1.1744	0.0398	0.0042	1.3792
P55	386842.5300	4228970.9503	692.0360	386842.4815	4228970.8317	691.4846	-0.0486	-0.1187	-0.5515	0.0024	0.0141	0.3041
P56	386713.5433	4229006.8001	701.6820	386714.0342	4229006.1312	700.9289	0.4909	-0.6689	-0.7531	0.2410	0.4475	0.5672
P57	387655.2616	4227629.3342	734.6990	387659.0755	4227629.8952	730.0768	3.8139	0.5610	-4.6222	14.5459	0.3148	21.3646
P58	387720.4979	4227771.0740	740.1940	387722.4399	4227770.7287	732.8463	1.9420	-0.3452	-7.3477	3.7714	0.1192	53.9890
P59	387490.4578	4227855.4441	728.9210	387490.9919	4227857.9148	726.9638	0.5341	2.4707	-1.9573	0.2852	6.1043	3.8309
P6	387429.5421	4230139.6278	742.4080	387428.9249	4230139.3624	742.5861	-0.6172	-0.2654	0.1780	0.3809	0.0705	0.0317
P60	387715.1131	4227998.9958	741.9510	387713.7645	4228000.6034	739.2491	-1.3486	1.6076	-2.7019	1.8188	2.5843	7.3003
P61	387560.3324	4228006.2053	740.0610	387560.1976	4228006.7555	738.3095	-0.1349	0.5502	-1.7515	0.0182	0.3028	3.0676
P62	387370.0020	4228036.1917	732.3780	387370.5145	4228037.1195	731.2327	0.5125	0.9279	-1.1453	0.2626	0.8609	1.3116
P63	387216.7972	4228082.3643	717.2390	387217.1263	4228082.6880	716.7549	0.3291	0.3237	-0.4841	0.1083	0.1048	0.2344
P64	387690.4784	4228228.0592	737.8190	387690.3975	4228228.0700	737.5847	-0.0809	0.0108	-0.2343	0.0065	0.0001	0.0549
P65	387510.0380	4228214.2390	738.5110	387509.5525	4228214.9511	736.5851	-0.4855	0.7121	-1.9259	0.2357	0.5070	3.7089
P66	387310.1306	4228238.2192	735.4810	387310.3356	4228237.8524	733.1670	0.2050	-0.3668	-2.3140	0.0420	0.1346	5.3547
P67	387108.0476	4228282.7355	716.1120	387108.5331	4228281.9587	713.5961	0.4855	-0.7768	-2.5159	0.2357	0.6034	6.3296
P68	387619.9088	4228407.4685	732.8970	387619.2939	4228407.8137	730.8856	-0.6150	0.3452	-2.0114	0.3782	0.1192	4.0458
P69	387410.9859	4228421.6936	734.1900	387410.9535	4228421.9741	732.0453	-0.0324	0.2805	-2.1447	0.0010	0.0787	4.5998
P7	387604.1957	4230148.8111	750.0750	387603.8904	4230148.7845	750.8561	-0.3053	-0.0265	0.7811	0.0932	0.0007	0.6102
P70	387204.5462	4228442.8558	730.3700	387204.7081	4228444.1936	728.8942	0.1618	1.3378	-1.4758	0.0262	1.7898	2.1781
P71	387055.7089	4228436.1886	722.1010	387055.9570	4228436.8791	721.7144	0.2481	0.6905	-0.3867	0.0616	0.4768	0.1495
P72	386901.5269	4228451.7094	708.0300	386901.6240	4228452.7883	706.7292	0.0971	1.0789	-1.3008	0.0094	1.1640	1.6922
P73	387744.2594	4228582.1693	732.1210	387744.3781	4228582.3203	730.7177	0.1187	0.1510	-1.4033	0.0141	0.0228	1.9691
P74	387497.1239	4228577.3196	732.0580	387497.0915	4228577.3196	730.6834	-0.0324	0.0000	-1.3746	0.0010	0.0000	1.8896
P75	387308.4319	4228555.0507	733.2590	387308.6153	4228554.8780	732.3200	0.1834	-0.1726	-0.9390	0.0336	0.0298	0.8816
P76	387127.9546	4228618.2944	727.0600	387128.4186	4228619.1144	725.8193	0.4639	0.8200	-1.2407	0.2152	0.6723	1.5394
P77	386924.4499	4228610.7497	720.6500	386924.6765	4228611.3323	719.8221	0.2266	0.5826	-0.8279	0.0513	0.3394	0.6854
P78	386772.7478	4228621.9948	675.7360	386772.9527	4228623.1816	673.3101	0.2050	1.1868	-2.4260	0.0420	1.4085	5.8853
P79	386924.7398	4229751.9000	728.0090	386925.1639	4229752.1950	728.3295	0.4241	0.2950	0.3206	0.1798	0.0870	0.1028
P8	387145.2424	4230058.8410	741.9480	387145.4315	4230058.5159	741.7827	0.1891	-0.3252	-0.1654	0.0358	0.1057	0.0273
P9	387306.6634	4230051.7295	744.8650	387306.3781	4230051.5570	744.2685	-0.2854	-0.1725	-0.5965	0.0814	0.0298	0.3558

Corrección automática de la geometría de fotogramas capturados desde plataformas aéreas no tripuladas

Tabla D.6: Test NSSDA. Ensayo2, MDT10m

Muestras	79.0000		RMSEr	0.8702							SumX_diff2	SumY_diff2	SumZ_diff2
RMSEx	0.5855		EXACTr	1.5061	siRMSEx=RMSEy						27.0866	32.7309	174.3122
RMSEy	0.6437		EXACTr	1.5044	siRMSEx!=RMSEy								
RMSEz	1.4854		EXACTr_z	2.9114									
ID	X_JA	Y_JA	Z_JA	X_ORTO	Y_ORTO	Z_ORTO	X_dif	Y_dif	Z_dif	X_diff2	Y_diff2	Z_diff2	
P1	387414.3261	4230464.8536	754.1644	387413.6625	4230464.6279	756.3657	-0.6636	-0.2256	2.2014	0.4404	0.0509	4.8459	
P10	387488.7415	4229935.2042	737.5070	387488.6862	4229935.0198	736.4058	-0.0553	-0.1844	-1.1012	0.0031	0.0340	1.2126	
P11	387696.2428	4229995.6397	743.0800	387696.1234	4229995.5600	743.7573	-0.1195	-0.0796	0.6772	0.0143	0.0063	0.4587	
P12	387305.8457	4229911.5717	739.1705	387305.1422	4229911.6514	737.9966	-0.7034	0.0796	-1.1738	0.4948	0.0063	1.3779	
P13	387113.7813	4229846.0229	736.0010	387113.7306	4229846.4286	735.1900	-0.0507	0.4056	-0.8110	0.0026	0.1645	0.6577	
P14	387818.6352	4229603.3380	720.9655	387818.4508	4229603.4487	720.3257	-0.1844	0.1106	-0.6398	0.0340	0.0122	0.4093	
P15	387698.1018	4229683.0148	724.1770	387698.0949	4229682.9733	722.8436	-0.0069	-0.0415	-1.3334	0	0.0017	1.7779	
P16	387707.6477	4229872.4063	736.7600	387707.4944	4229872.4793	737.0353	-0.1533	0.0730	0.2753	0.0235	0.0053	0.0758	
P17	387558.2219	4229747.3545	730.2205	387558.1854	4229747.5541	729.9115	-0.0365	0.1996	-0.3090	0.0013	0.0398	0.0955	
P18	387312.3821	4229767.1464	738.0200	387312.2482	4229767.0685	737.2012	-0.1339	-0.0779	-0.8188	0.0179	0.0061	0.6704	
P19	387164.2533	4229644.4100	742.7610	387164.1024	4229644.6388	742.8464	-0.1509	0.2288	0.0855	0.0228	0.0523	0.0073	
P2	387412.7230	4230274.0240	745.9970	387412.6301	4230273.8116	746.7406	-0.0929	-0.2124	0.7436	0.0086	0.0451	0.5529	
P20	386991.8287	4229625.8917	726.5600	386992.1767	4229625.7846	726.3961	0.3481	-0.1071	-0.1639	0.1211	0.0115	0.0269	
P21	386832.1961	4229620.1539	717.0830	386832.1985	4229620.1101	717.1669	0.0024	-0.0438	0.0839	0	0.0019	0.0070	
P22	387398.9215	4229370.9259	723.5435	387398.4614	4229371.1352	722.9646	-0.4600	0.2093	-0.5789	0.2116	0.0438	0.3351	
P23	387223.4004	4229321.6689	723.4865	387223.0572	4229321.5569	722.7979	-0.3432	-0.1120	-0.6887	0.1178	0.0125	0.4743	
P24	387016.7497	4229315.3796	718.2120	387016.2507	4229315.1605	717.2585	-0.4990	-0.2191	-0.9535	0.2490	0.0480	0.9092	
P25	386785.0624	4229301.9567	703.6410	386785.3180	4229301.8058	703.3071	0.2556	-0.1509	-0.3339	0.0653	0.0228	0.1115	
P26	387785.0601	4229464.7546	707.6735	387785.1259	4229464.6767	706.8020	0.0657	-0.0779	-0.8715	0.0043	0.0061	0.7595	
P27	387642.7353	4229524.5840	721.7755	387642.7231	4229524.4136	720.5928	-0.0122	-0.1704	-1.1827	0.0001	0.0290	1.3989	
P28	387482.5226	4229588.0645	727.0625	387482.1794	4229588.1108	726.1397	-0.3432	0.0462	-0.9228	0.1178	0.0021	0.8515	
P29	387277.2530	4229537.4710	732.1900	387277.1970	4229537.4321	731.3129	-0.0560	-0.0389	-0.8771	0.0031	0.0015	0.7694	
P3	387251.4415	4230259.7542	742.3765	387251.3751	4230259.6480	742.2027	-0.0664	-0.1062	-0.1738	0.0044	0.0113	0.0302	
P30	387088.3070	4229448.6301	726.8775	387088.2803	4229448.5766	726.6243	-0.0268	-0.0535	-0.2532	0.0007	0.0029	0.0641	
P31	386949.5727	4229461.1035	728.3580	386949.1485	4229461.0058	728.1998	-0.4241	-0.0977	-0.1581	0.1799	0.0095	0.0250	
P32	386816.4704	4229491.1414	712.3500	386816.4704	4229491.3470	712.4058	0.0000	0.2056	0.0558	0.0000	0.0423	0.0031	
P33	387848.3724	4229334.8521	715.9420	387848.9798	4229334.8076	715.0748	0.6074	-0.0445	-0.8673	0.3690	0.0020	0.7521	
P34	387695.9787	4229358.0940	700.0280	387696.1861	4229358.0551	698.4507	0.2074	-0.0389	-1.5773	0.0430	0.0015	2.4880	
P35	387549.6092	4229412.0050	711.4155	387549.4393	4229412.0883	710.1005	-0.1700	0.0832	-1.3150	0.0289	0.0069	1.7293	
P36	387302.5914	4229220.4318	707.5570	387302.1648	4229220.3208	706.0562	-0.4266	-0.1110	-1.5008	0.1820	0.0123	2.2524	
P37	387113.0526	4229145.3165	703.1880	387113.4723	4229145.0321	702.3420	0.4197	-0.2844	-0.8460	0.1761	0.0809	0.7157	
P38	386905.4851	4229131.0384	716.8790	386905.1695	4229131.2881	716.8923	-0.3156	0.2497	0.0132	0.0996	0.0624	0.0002	
P39	386738.8214	4229155.9806	697.2345	386739.0884	4229155.7325	696.8845	0.2670	-0.2481	-0.3500	0.0713	0.0616	0.1225	
P4	387104.2084	4230190.2859	735.7955	387104.3743	4230190.5381	735.4330	0.1659	0.2522	-0.3625	0.0275	0.0636	0.1314	
P40	387795.0903	4229133.2385	719.7990	387794.9851	4229133.5083	719.4102	-0.1052	0.2697	-0.3889	0.0111	0.0728	0.1512	
P41	387637.5571	4229199.8542	706.2470	387637.2496	4229200.0592	705.9128	-0.3075	0.2050	-0.3342	0.0945	0.0420	0.1117	
P42	387481.8465	4229264.5029	704.8325	387481.6900	4229263.5967	703.7382	-0.1564	-0.9063	-1.0943	0.0245	0.8213	1.1975	
P43	387845.5498	4228893.8751	727.5760	387845.6253	4228893.9128	727.2842	0.0755	0.0378	-0.2918	0.0057	0.0014	0.0851	
P44	387578.7997	4228853.0308	706.7165	387578.9885	4228851.4664	705.6304	0.1888	-1.5644	-1.0861	0.0356	2.4474	1.1795	
P45	387430.6788	4228839.9592	718.5745	387430.5979	4228840.9086	717.2585	-0.0809	0.9494	-1.3160	0.0065	0.9014	1.7320	
P46	387217.2358	4228825.2402	714.2220	387217.0901	4228826.6428	713.4130	-0.1457	1.4026	-0.8090	0.0212	1.9672	0.6544	
P47	387049.6328	4228839.6011	695.9880	387049.4629	4228841.3165	694.6815	-0.1699	1.7155	-1.3065	0.0289	2.9428	1.7068	
P48	386878.5847	4228800.5703	669.0695	386878.8598	4228802.0592	667.2671	0.2751	1.4889	-1.8024	0.0757	2.2168	3.2488	
P49	386720.6740	4228788.0331	665.4085	386720.9599	4228787.0297	662.7349	0.2859	-1.0034	-2.6736	0.0817	1.0068	7.1481	
P5	387032.3739	4230019.1332	730.4485	387032.4071	4230019.0402	729.9395	0.0332	-0.0929	-0.5090	0.0011	0.0086	0.2591	
P50	387760.2616	4229049.1240	722.5205	387760.2346	4229049.3613	722.0349	-0.0270	0.2374	-0.4857	0.0007	0.0563	0.2359	

P51	387577.4558	4229043.6051	715.1860	387577.0835	4229043.1195	714.4812	-0.3722	-0.4855	-0.7048	0.1385	0.2357	0.4967
P52	387405.1670	4229033.6591	711.0410	387405.0106	4229033.4865	710.5289	-0.1564	-0.1726	-0.5122	0.0245	0.0298	0.2623
P53	387211.9355	4229012.5091	680.1065	387211.5093	4229011.7862	680.7645	-0.4262	-0.7229	0.6580	0.1816	0.5225	0.4329
P54	387019.4590	4229015.5692	674.2800	387019.2594	4229015.5045	672.8446	-0.1996	-0.0647	-1.4354	0.0398	0.0042	2.0605
P55	386842.5300	4228970.9503	692.6110	386842.4815	4228970.8317	691.4846	-0.0486	-0.1187	-1.1265	0.0024	0.0141	1.2689
P56	386713.5433	4229006.8001	701.0350	386714.0342	4229006.1312	700.9289	0.4909	-0.6689	-0.1061	0.2410	0.4475	0.0113
P57	387655.2616	4227629.3342	734.7500	387659.0755	4227629.8952	730.0768	3.8139	0.5610	-4.6732	14.5459	0.3148	21.8390
P58	387720.4979	4227771.0740	740.1185	387722.4399	4227770.7287	732.8463	1.9420	-0.3452	-7.2723	3.7714	0.1192	52.8861
P59	387490.4578	4227855.4441	728.9125	387490.9919	4227857.9148	726.9638	0.5341	2.4707	-1.9487	0.2852	6.1043	3.7975
P6	387429.5421	4230139.6278	742.3990	387428.9249	4230139.3624	742.5861	-0.6172	-0.2654	0.1871	0.3809	0.0705	0.0350
P60	387715.1131	4227998.9958	741.8990	387713.7645	4228000.6034	739.2491	-1.3486	1.6076	-2.6499	1.8188	2.5843	7.0220
P61	387560.3324	4228006.2053	740.1650	387560.1976	4228006.7555	738.3095	-0.1349	0.5502	-1.8555	0.0182	0.3028	3.4428
P62	387370.0020	4228036.1917	732.5195	387370.5145	4228037.1195	731.2327	0.5125	0.9279	-1.2867	0.2626	0.8609	1.6557
P63	387216.7972	4228082.3643	718.0640	387217.1263	4228082.6880	716.7549	0.3291	0.3237	-1.3092	0.1083	0.1048	1.7139
P64	387690.4784	4228228.0592	737.9510	387690.3975	4228228.0700	737.5847	-0.0809	0.0108	-0.3663	0.0065	0.0001	0.1342
P65	387510.0380	4228214.2390	738.5445	387509.5525	4228214.9511	736.5851	-0.4855	0.7121	-1.9594	0.2357	0.5070	3.8391
P66	387310.1306	4228238.2192	735.4015	387310.3356	4228237.8524	733.1670	0.2050	-0.3668	-2.2345	0.0420	0.1346	4.9930
P67	387108.0476	4228282.7355	715.5165	387108.5331	4228281.9587	713.5961	0.4855	-0.7768	-1.9204	0.2357	0.6034	3.6877
P68	387619.9088	4228407.4685	732.5940	387619.2939	4228407.8137	730.8856	-0.6150	0.3452	-1.7084	0.3782	0.1192	2.9187
P69	387410.9859	4228421.6936	734.0695	387410.9535	4228421.9741	732.0453	-0.0324	0.2805	-2.0242	0.0010	0.0787	4.0975
P7	387604.1957	4230148.8111	749.9805	387603.8904	4230148.7845	750.8561	-0.3053	-0.0265	0.8756	0.0932	0.0007	0.7667
P70	387204.5462	4228442.8558	730.3475	387204.7081	4228444.1936	728.8942	0.1618	1.3378	-1.4533	0.0262	1.7898	2.1121
P71	387055.7089	4228436.1886	722.4075	387055.9570	4228436.8791	721.7144	0.2481	0.6905	-0.6931	0.0616	0.4768	0.4804
P72	386901.5269	4228451.7094	708.2460	386901.6240	4228452.7883	706.7292	0.0971	1.0789	-1.5168	0.0094	1.1640	2.3006
P73	387744.2594	4228582.1693	732.0695	387744.3781	4228582.3203	730.7177	0.1187	0.1510	-1.3518	0.0141	0.0228	1.8274
P74	387497.1239	4228577.3196	731.7600	387497.0915	4228577.3196	730.6834	-0.0324	0.0000	-1.0767	0.0010	0.0000	1.1592
P75	387308.4319	4228555.0507	733.3535	387308.6153	4228554.8780	732.3200	0.1834	-0.1726	-1.0335	0.0336	0.0298	1.0681
P76	387127.9546	4228618.2944	726.9555	387128.4186	4228619.1144	725.8193	0.4639	0.8200	-1.1362	0.2152	0.6723	1.2910
P77	386924.4499	4228610.7497	720.5870	386924.6765	4228611.3323	719.8221	0.2266	0.5826	-0.7648	0.0513	0.3394	0.5850
P78	386772.7478	4228621.9948	674.7315	386772.9527	4228623.1816	673.3101	0.2050	1.1868	-1.4215	0.0420	1.4085	2.0205
P79	386924.7398	4229751.9000	728.1145	386925.1639	4229752.1950	728.3295	0.4241	0.2950	0.2150	0.1798	0.0870	0.0462
P8	387145.2424	4230058.8410	741.8125	387145.4315	4230058.5159	741.7827	0.1891	-0.3252	-0.0299	0.0358	0.1057	0.0009
P9	387306.6634	4230051.7295	744.7685	387306.3781	4230051.5570	744.2685	-0.2854	-0.1725	-0.5000	0.0814	0.0298	0.2500

Corrección automática de la geometría de fotogramas capturados desde plataformas aéreas no tripuladas

Tabla D.7: Test NSSDA. Ensayo3, MDT05m

Muestras	79.0000		RMSEr	1.3932							SumX_diff2	SumY_diff2	SumZ_diff2
RMSEx	0.7778		EXACTr	2.4114	siRMSEx=RMSEy						47.7893	105.5527	449.1407
RMSEy	1.1559		EXACTr	2.3665	siRMSEx!=RMSEy						X_diff2	Y_diff2	Z_diff2
RMSEz	2.3844		EXACTr_z	4.6734									
ID	X_JA	Y_JA	Z_JA	X_ORTO	Y_ORTO	Z_ORTO	X_dif	Y_dif	Z_dif	X_diff2	Y_diff2	Z_diff2	
P1	387414.3261	4230464.8536	754.7910	387412.4402	4230463.8635	754.2590	-1.8859	-0.9901	-0.5321	3.5566	0.9803	0.2831	
P10	387488.7415	4229935.2042	737.3330	387488.0186	4229934.6542	736.3691	-0.7229	-0.5501	-0.9639	0.5226	0.3026	0.9290	
P11	387696.2428	4229995.6397	743.1340	387695.5828	4229995.8125	742.9217	-0.6601	0.1729	-0.2123	0.4357	0.0299	0.0451	
P12	387305.8457	4229911.5717	739.0840	387304.1955	4229911.3124	737.9198	-1.6502	-0.2593	-1.1642	2.7230	0.0672	1.3553	
P13	387113.7813	4229846.0229	736.0320	387112.7755	4229845.9444	735.7800	-1.0058	-0.0786	-0.2520	1.0116	0.0062	0.0635	
P14	387818.6352	4229603.3380	721.4860	387818.2894	4229603.4480	720.4981	-0.3457	0.1100	-0.9879	0.1195	0.0121	0.9760	
P15	387698.1018	4229683.0148	724.3970	387697.6932	4229682.9677	723.3557	-0.4086	-0.0471	-1.0413	0.1670	0.0022	1.0843	
P16	387707.6477	4229872.4063	736.2770	387707.0819	4229872.7049	736.6591	-0.5658	0.2986	0.3821	0.3201	0.0892	0.1460	
P17	387558.2219	4229747.3545	729.9150	387557.6876	4229747.4330	730.1220	-0.5343	0.0786	0.2070	0.2855	0.0062	0.0428	
P18	387312.3821	4229767.1464	737.8590	387311.5963	4229766.7221	737.2274	-0.7858	-0.4243	-0.6317	0.6175	0.1801	0.3990	
P19	387164.2533	4229644.4100	743.0040	387163.4360	4229644.1114	742.7761	-0.8172	-0.2986	-0.2280	0.6678	0.0892	0.0520	
P2	387412.7230	4230274.0240	745.9830	387411.4186	4230273.5918	745.9301	-1.3044	-0.4322	-0.0529	1.7015	0.1868	0.0028	
P20	386991.8287	4229625.8917	726.3850	386991.5143	4229625.1530	725.9499	-0.3143	-0.7386	-0.4351	0.0988	0.5456	0.1893	
P21	386832.1961	4229620.1539	716.9870	386831.7246	4229619.2581	715.7550	-0.4715	-0.8958	-1.2320	0.2223	0.8025	1.5178	
P22	387398.9215	4229370.9259	723.4430	387398.1357	4229370.7216	723.6378	-0.7858	-0.2043	0.1948	0.6175	0.0417	0.0380	
P23	387223.4004	4229321.6689	723.0190	387222.8032	4229321.1503	723.6743	-0.5972	-0.5186	0.6553	0.3566	0.2690	0.4294	
P24	387016.7497	4229315.3796	718.4390	387015.9010	4229314.5467	717.4845	-0.8486	-0.8329	-0.9545	0.7202	0.6938	0.9111	
P25	386785.0624	4229301.9567	703.9890	386785.3139	4229301.1866	702.3400	0.2515	-0.7701	-1.6490	0.0632	0.5930	2.7191	
P26	387785.0601	4229464.7546	708.1200	387784.8401	4229464.5189	707.2327	-0.2200	-0.2357	-0.8873	0.0484	0.0556	0.7874	
P27	387642.7353	4229524.5840	721.0910	387642.3896	4229524.3168	721.1256	-0.3457	-0.2672	0.0346	0.1195	0.0714	0.0012	
P28	387482.5226	4229588.0645	727.3370	387481.7682	4229587.7974	726.5416	-0.7544	-0.2672	-0.7954	0.5691	0.0714	0.6327	
P29	387277.2530	4229537.4710	732.2870	387276.6873	4229537.0781	731.7463	-0.5658	-0.3929	-0.5407	0.3201	0.1544	0.2923	
P3	387251.4415	4230259.7542	742.4840	387250.2785	4230258.9841	741.1922	-1.1630	-0.7701	-1.2918	1.3525	0.5930	1.6688	
P30	387088.3070	4229448.6301	727.0800	387087.8356	4229448.1115	726.9323	-0.4715	-0.5186	-0.1478	0.2223	0.2690	0.0218	
P31	386949.5727	4229461.1035	728.5370	386948.6926	4229460.3334	727.8159	-0.8801	-0.7701	-0.7211	0.7745	0.5930	0.5199	
P32	386816.4704	4229491.1414	711.9720	386816.1247	4229490.5285	711.1582	-0.3457	-0.6129	-0.8138	0.1195	0.3757	0.6622	
P33	387848.3724	4229334.8521	716.3040	387848.7810	4229334.4907	715.3074	0.4086	-0.3615	-0.9966	0.1670	0.1307	0.9932	
P34	387695.9787	4229358.0940	700.0720	387695.9472	4229357.8269	698.8621	-0.0314	-0.2672	-1.2099	0.0010	0.0714	1.4639	
P35	387549.6092	4229412.0050	710.7660	387549.1692	4229411.7379	710.6398	-0.4400	-0.2672	-0.1262	0.1936	0.0714	0.0159	
P36	387302.5914	4229220.4318	707.0700	387301.9314	4229220.0074	706.9255	-0.6601	-0.4243	-0.1445	0.4357	0.1801	0.0209	
P37	387113.0526	4229145.3165	703.2130	387113.1469	4229144.6093	703.1479	0.0943	-0.7072	-0.0651	0.0089	0.5001	0.0042	
P38	386905.4851	4229131.0384	716.8290	386905.0451	4229130.8341	716.6112	-0.4400	-0.2043	-0.2178	0.1936	0.0417	0.0474	
P39	386738.8214	4229155.9806	697.1330	386739.0728	4229155.1791	695.4562	0.2515	-0.8015	-1.6768	0.0632	0.6424	2.8115	
P4	387104.2084	4230190.2859	735.8790	387103.2969	4230190.1759	733.5506	-0.9115	-0.1100	-2.3284	0.8309	0.0121	5.4216	
P40	387795.0903	4229133.2385	719.7290	387794.7445	4229133.2857	719.4871	-0.3457	0.0471	-0.2419	0.1195	0.0022	0.0585	
P41	387637.5571	4229199.8542	706.7170	387636.9913	4229199.6813	706.1973	-0.5658	-0.1729	-0.5197	0.3201	0.0299	0.2701	
P42	387481.8465	4229264.5029	704.5620	387481.4379	4229263.4185	704.2250	-0.4086	-1.0844	-0.3370	0.1670	1.1759	0.1135	
P43	387845.5498	4228893.8751	727.8060	387845.3926	4228893.8594	726.7805	-0.1572	-0.0157	-1.0255	0.0247	0.0002	1.0517	
P44	387578.7997	4228853.0308	706.7000	387578.6425	4228851.5064	705.6967	-0.1572	-1.5244	-1.0034	0.0247	2.3239	1.0067	
P45	387430.6788	4228839.9592	718.5410	387430.4588	4228840.9807	717.2285	-0.2200	1.0215	-1.3126	0.0484	1.0435	1.7228	
P46	387217.2358	4228825.2402	714.4850	387216.9214	4228826.6075	713.5248	-0.3143	1.3673	-0.9602	0.0988	1.8694	0.9219	
P47	387049.6328	4228839.6011	695.8250	387049.4442	4228841.3770	695.0011	-0.1886	1.7759	-0.8239	0.0356	3.1537	0.6788	
P48	386878.5847	4228800.5703	669.6310	386879.1505	4228801.8747	667.2837	0.5658	1.3044	-2.3473	0.3201	1.7015	5.5098	
P49	386720.6740	4228788.0331	665.9200	386721.3341	4228787.1058	661.6856	0.6601	-0.9272	-4.2344	0.4357	0.8598	17.9299	
P5	387032.3739	4230019.1332	730.3670	387031.5252	4230018.5517	727.9851	-0.8486	-0.5815	-2.3820	0.7202	0.3381	5.6737	
P50	387760.2616	4229049.1240	722.4910	387759.9473	4229049.1711	721.9903	-0.3143	0.0471	-0.5007	0.0988	0.0022	0.2507	

P51	387577.4558	4229043.6051	715.8920	387576.8900	4229042.9607	714.6945	-0.5658	-0.6443	-1.1975	0.3201	0.4152	1.4340
P52	387405.1670	4229033.6591	711.4890	387404.7270	4229033.4863	710.7410	-0.4400	-0.1729	-0.7480	0.1936	0.0299	0.5596
P53	387211.9355	4229012.5091	680.0850	387211.5583	4229011.7390	681.0741	-0.3772	-0.7701	0.9891	0.1423	0.5930	0.9783
P54	387019.4590	4229015.5692	674.0190	387019.1761	4229015.0506	673.3369	-0.2829	-0.5186	-0.6821	0.0800	0.2690	0.4652
P55	386842.5300	4228970.9503	692.0360	386842.6243	4228970.4317	690.9504	0.0943	-0.5186	-1.0856	0.0089	0.2690	1.1785
P56	386713.5433	4229006.8001	701.6820	386714.0147	4229005.7157	699.4158	0.4715	-1.0844	-2.2662	0.2223	1.1759	5.1356
P57	387655.2616	4227629.3342	734.6990	387653.7214	4227634.9447	724.2189	-1.5401	5.6105	-10.4801	2.3720	31.4779	109.8325
P58	387720.4979	4227771.0740	740.1940	387717.8891	4227775.0186	732.4962	-2.6088	3.9446	-7.6978	6.8059	15.5603	59.2554
P59	387490.4578	4227855.4441	728.9210	387490.6778	4227858.9801	724.5011	0.2200	3.5360	-4.4199	0.0484	12.5036	19.5357
P6	387429.5421	4230139.6278	742.4080	387427.9234	4230139.0699	742.1844	-1.6187	-0.5579	-0.2236	2.6203	0.3113	0.0500
P60	387715.1131	4227998.9958	741.9510	387713.1643	4228001.3060	736.9641	-1.9488	2.3102	-4.9869	3.7976	5.3371	24.8696
P61	387560.3324	4228006.2053	740.0610	387559.7981	4228007.3840	737.1916	-0.5343	1.1787	-2.8694	0.2855	1.3893	8.2333
P62	387370.0020	4228036.1917	732.3780	387370.3792	4228037.6532	729.7275	0.3772	1.4616	-2.6505	0.1423	2.1362	7.0252
P63	387216.7972	4228082.3643	717.2390	387217.2687	4228082.5057	713.9481	0.4715	0.1414	-3.2909	0.2223	0.0200	10.8300
P64	387690.4784	4228228.0592	737.8190	387690.0069	4228228.2950	735.5001	-0.4715	0.2357	-2.3189	0.2223	0.0556	5.3773
P65	387510.0380	4228214.2390	738.5110	387509.1580	4228215.4805	735.4621	-0.8801	1.2415	-3.0489	0.7745	1.5414	9.2957
P66	387310.1306	4228238.2192	735.4810	387310.0363	4228238.2664	731.0929	-0.0943	0.0471	-4.3881	0.0089	0.0022	19.2556
P67	387108.0476	4228282.7355	716.1120	387108.2362	4228282.5312	710.8851	0.1886	-0.2043	-5.2269	0.0356	0.0417	27.3202
P68	387619.9088	4228407.4685	732.8970	387618.8087	4228408.3642	729.8185	-1.1001	0.8958	-3.0785	1.2102	0.8025	9.4771
P69	387410.9859	4228421.6936	734.1900	387410.7973	4228422.2122	731.0929	-0.1886	0.5186	-3.0971	0.0356	0.2690	9.5920
P7	387604.1957	4230148.8111	750.0750	387602.5612	4230149.1332	749.7532	-1.6344	0.3222	-0.3218	2.6714	0.1038	0.1036
P70	387204.5462	4228442.8558	730.3700	387204.4834	4228444.4116	727.9980	-0.0629	1.5559	-2.3720	0.0040	2.4207	5.6264
P71	387055.7089	4228436.1886	722.1010	387055.8031	4228437.0844	720.4428	0.0943	0.8958	-1.6582	0.0089	0.8025	2.7496
P72	386901.5269	4228451.7094	708.0300	386901.4955	4228453.1709	704.9343	-0.0314	1.4616	-3.0958	0.0010	2.1362	9.5837
P73	387744.2594	4228582.1693	732.1210	387744.1651	4228582.4679	729.7275	-0.0943	0.2986	-2.3935	0.0089	0.0892	5.7288
P74	387497.1239	4228577.3196	732.0580	387496.8095	4228577.5868	730.0006	-0.3143	0.2672	-2.0574	0.0988	0.0714	4.2330
P75	387308.4319	4228555.0507	733.2590	387308.4004	4228555.1607	731.4570	-0.0314	0.1100	-1.8020	0.0010	0.0121	3.2472
P76	387127.9546	4228618.2944	727.0600	387128.1747	4228619.3474	725.3582	0.2200	1.0530	-1.7018	0.0484	1.1087	2.8961
P77	386924.4499	4228610.7497	720.6500	386924.5128	4228611.7398	719.0319	0.0629	0.9901	-1.6181	0.0040	0.9803	2.6182
P78	386772.7478	4228621.9948	675.7360	386773.3450	4228623.3307	671.6984	0.5972	1.3358	-4.0376	0.3566	1.7845	16.3021
P79	386924.7398	4229751.9000	728.0090	386924.2684	4229751.4442	726.8146	-0.4715	-0.4558	-1.1943	0.2223	0.2077	1.4264
P8	387145.2424	4230058.8410	741.9480	387144.5195	4230058.3774	740.5217	-0.7229	-0.4636	-1.4263	0.5226	0.2149	2.0344
P9	387306.6634	4230051.7295	744.8650	387305.1626	4230051.2934	743.7910	-1.5009	-0.4361	-1.0740	2.2526	0.1902	1.1534

Corrección automática de la geometría de fotografías capturados desde plataformas aéreas no tripuladas

Tabla D.8: Test NSSDA. Ensayo3, MDT10m

[illegible]

P50	387760.2616	4229049.1240	722.5205	387759.9473	4229049.1711	721.9903	-0.3143	0.0471	-0.5302	0.0988	0.0022	0.2811
P51	387577.4558	4229043.6051	715.1860	387576.8900	4229042.9607	714.6945	-0.5658	-0.6443	-0.4915	0.3201	0.4152	0.2415
P52	387405.1670	4229033.6591	711.0410	387404.7270	4229033.4863	710.7410	-0.4400	-0.1729	-0.3001	0.1936	0.0299	0.0900
P53	387211.9355	4229012.5091	680.1065	387211.5583	4229011.7390	681.0741	-0.3772	-0.7701	0.9676	0.1423	0.5930	0.9362
P54	387019.4590	4229015.5692	674.2800	387019.1761	4229015.0506	673.3369	-0.2829	-0.5186	-0.9431	0.0800	0.2690	0.8895
P55	386842.5300	4228970.9503	692.6110	386842.6243	4228970.4317	690.9504	0.0943	-0.5186	-1.6606	0.0089	0.2690	2.7575
P56	386713.5433	4229006.8001	701.0350	386714.0147	4229005.7157	699.4158	0.4715	-1.0844	-1.6191	0.2223	1.1759	2.6216
P57	387655.2616	4227629.3342	734.7500	387653.7214	4227634.9447	724.2189	-1.5401	5.6105	-10.5311	2.3720	31.4779	110.9047
P58	387720.4979	4227771.0740	740.1185	387717.8891	4227775.0186	732.4962	-2.6088	3.9446	-7.6223	6.8059	15.5603	58.0996
P59	387490.4578	4227855.4441	728.9125	387490.6778	4227858.9801	724.5011	0.2200	3.5360	-4.4114	0.0484	12.5036	19.4603
P6	387429.5421	4230139.6278	742.3990	387427.9234	4230139.0699	742.1844	-1.6187	-0.5579	-0.2146	2.6203	0.3113	0.0461
P60	387715.1131	4227998.9958	741.8990	387713.1643	4228001.3060	736.9641	-1.9488	2.3102	-4.9349	3.7976	5.3371	24.3536
P61	387560.3324	4228006.2053	740.1650	387559.7981	4228007.3840	737.1916	-0.5343	1.1787	-2.9734	0.2855	1.3893	8.8410
P62	387370.0020	4228036.1917	732.5195	387370.3792	4228037.6532	729.7275	0.3772	1.4616	-2.7920	0.1423	2.1362	7.7952
P63	387216.7972	4228082.3643	718.0640	387217.2687	4228082.5057	713.9481	0.4715	0.1414	-4.1159	0.2223	0.0200	16.9407
P64	387690.4784	4228228.0592	737.9510	387690.0069	4228228.2950	735.5001	-0.4715	0.2357	-2.4509	0.2223	0.0556	6.0071
P65	387510.0380	4228214.2390	738.5445	387509.1580	4228215.4805	735.4621	-0.8801	1.2415	-3.0824	0.7745	1.5414	9.5011
P66	387310.1306	4228238.2192	735.4015	387310.0363	4228238.2664	731.0929	-0.0943	0.0471	-4.3086	0.0089	0.0022	18.5639
P67	387108.0476	4228282.7355	715.5165	387108.2362	4228282.5312	710.8851	0.1886	-0.2043	-4.6314	0.0356	0.0417	21.4494
P68	387619.9088	4228407.4685	732.5940	387618.8087	4228408.3642	729.8185	-1.1001	0.8958	-2.7755	1.2102	0.8025	7.7035
P69	387410.9859	4228421.6936	734.0695	387410.7973	4228422.2122	731.0929	-0.1886	0.5186	-2.9766	0.0356	0.2690	8.8603
P7	387604.1957	4230148.8111	749.9805	387602.5612	4230149.1332	749.7532	-1.6344	0.3222	-0.2274	2.6714	0.1038	0.0517
P70	387204.5462	4228442.8558	730.3475	387204.4834	4228444.4116	727.9980	-0.0629	1.5559	-2.3495	0.0040	2.4207	5.5201
P71	387055.7089	4228436.1886	722.4075	387055.8031	4228437.0844	720.4428	0.0943	0.8958	-1.9647	0.0089	0.8025	3.8599
P72	386901.5269	4228451.7094	708.2460	386901.4955	4228453.1709	704.9343	-0.0314	1.4616	-3.3117	0.0010	2.1362	10.9674
P73	387744.2594	4228582.1693	732.0695	387744.1651	4228582.4679	729.7275	-0.0943	0.2986	-2.3420	0.0089	0.0892	5.4852
P74	387497.1239	4228577.3196	731.7600	387496.8095	4228577.5868	730.0006	-0.3143	0.2672	-1.7595	0.0988	0.0714	3.0957
P75	387308.4319	4228555.0507	733.3535	387308.4004	4228555.1607	731.4570	-0.0314	0.1100	-1.8966	0.0010	0.0121	3.5969
P76	387127.9546	4228618.2944	726.9555	387128.1747	4228619.3474	725.3582	0.2200	1.0530	-1.5973	0.0484	1.1087	2.5513
P77	386924.4499	4228610.7497	720.5870	386924.5128	4228611.7398	719.0319	0.0629	0.9901	-1.5551	0.0040	0.9803	2.4182
P78	386772.7478	4228621.9948	674.7315	386773.3450	4228623.3307	671.6984	0.5972	1.3358	-3.0331	0.3566	1.7845	9.1996
P79	386924.7398	4229751.9000	728.1145	386924.2684	4229751.4442	726.8146	-0.4715	-0.4558	-1.2999	0.2223	0.2077	1.6896
P8	387145.2424	4230058.8410	741.8125	387144.5195	4230058.3774	740.5217	-0.7229	-0.4636	-1.2908	0.5226	0.2149	1.6662
P9	387306.6634	4230051.7295	744.7685	387305.1626	4230051.2934	743.7910	-1.5009	-0.4361	-0.9775	2.2526	0.1902	0.9554

Corrección automática de la geometría de fotogramas capturados desde plataformas aéreas no tripuladas

D.6. Ortofoto y modelo digital del terreno del Ensayo1

Se incluye la ortofoto *ensayo1.tif*, y el modelo digital del terreno *ensayo1.mdt.tif*, ambos con sistema UTM 30N ETRS 1989 (EPSG 25830).

D.7. Herramientas MicMac utilizadas para elaboración de ortofotos

Básicamente consisten en comandos simplificados que se invocan desde una *shell*, especificando a través de expresiones regulares los ficheros que el comando debe utilizar, y con parámetros adicionales la forma de operar del comando; estos comandos generan ficheros xml y realizan llamadas a otros comandos a su vez más complejos. Los desarrolladores están trabajando en un interfaz gráfico, pero aún se encuentra en una etapa temprana. El uso de comandos permite concatenar operaciones entre sí y establecer flujos de trabajo, permitiendo un mayor control sobre el entorno de ejecución. No se explica en detalle el modo de funcionamiento y parámetros de control de cada comando, sólo los aspectos más relevantes o característicos; para mayor información, consulte la documentación de MicMac¹.

D.7.1. Comandos simplificados

Tapioca

Es un interfaz simplificado a la utilidad Pastis, que a su vez es otro interfaz al algoritmo sift++ implementado por vlfeat ². La función principal de este interfaz es adecuar los resultados de sift++ al formato utilizado por las utilidades MicMac.

La sintaxis del comando es:

Tapioca Mode Files Arg1 Arg2 ... Opt1=Val Opt2=Val ...

- Mode. Puede tomar valores All, Line, MulScale, File. En esta tesis se ha empleado el modo MulScale, que hace uso de dos escalas de resolución de las imágenes para identificar puntos correlativos. Es el modo más idóneo cuando se trabaja con extensas colecciones de imágenes. Hace un primer cálculo de puntos correlativos a muy baja resolución (primera escala), y posteriormente se vuelven a detectar puntos correlativos

¹<http://logiciels.ign.fr/IMG/pdf/docmicmac.pdf>, accedido 22 Enero 2014

²<http://www.robots.ox.ac.uk/~vedaldi/code/siftpp.html>, accedido 22 Enero 2014

a la segunda resolución especificada, pero únicamente sobre aquellas imágenes que han resultado ser correlativas en el primer cálculo.

- Files. Expresión regular que identifica las imágenes sobre las que detectar puntos correlativos.

Ejemplo: *Tapioca MulScale ".*JPG"1000 2000*

Tapas

Es un interfaz simplificado a la utilidad Apero, utilidad más compleja que permite calcular la orientación relativa del conjunto de imágenes.

La sintaxis del comando es:

Tapas ModeCalib PatternImage

- ModeCalib. Especifica el modelo de calibración de la cámara. En función del tipo de distorsión y grados de libertad, el modelo puede ser: Fraser, FraserBasic, RadialExtended, RadialBasic, FishEyeEqui, HemiEqui, AutoCal, Figeo. En esta tesis se ha utilizado el modelo Fraser, que posee 12 grados de libertad: 1 para distancia focal, 2 para el punto principal, 2 para centro de distorsión, 3 para los coeficientes de distorsión radial, 2 para parámetros decéntricos, 2 para parámetros afines.
- PatternImage. Expresión regular que especifica el conjunto de imágenes a orientar.

Para calibrar la cámara, antes/después del vuelo se toman varias fotos de un objeto en condiciones controladas, y se calcula un modelo de calibración *fcalib*; posteriormente se vuelve a calibrar el modelo con las imágenes del vuelo, pero tomando *fcalib* como modelo inicial.

Ejemplo:

*Tapas Fraser "calib.*JPG" Out=fcalib; Tapas Fraser "imagen-aerea.*JPG" InCal=fcalib Out=orientacion-relativa.*

GCPCConvert Utilidad para convertir un conjunto de puntos de control sobre el terreno expresados WGS84 a un sistema local de coordenadas euclídeas, sistema empleado internamente por las utilidades MicMac para resolver ecuaciones. Este parámetro recibe un fichero de texto plano con el siguiente formato:

identificador - longitud - latitud - altura sobre el nivel del mar

La sintaxis del comando es:

mm3d GCPCConvert "#F=N_X-Y-Z" gcp.csv ChSys=DegreeWGS84@SysCoRTL.xml Out=AppRTL.xml

- gcp.csv. Fichero con los puntos de control sobre el terreno, siguiendo el formato descrito anteriormente.
- SysCoRTL.xml. Fichero que contiene la coordenada geográfica que se tomará como coordenada origen en el nuevo sistema. Se recomienda utilizar una coordenada ubicada en la región central del mosaico.
- AppRTL.xml. Fichero en el que se guarda el resultado.

SaisieAppuisInit Utilidad para situar con precisión los puntos de control en las imágenes. La sintaxis es:

SaisieAppuisInit Imagen Orientacion Puntos Resultado

- Imagen. Patrón que especifica las imágenes sobre las que queremos situar el punto.
- Orientación. Identifica el directorio en el que se puede encontrar la orientación relativa de las imágenes.
- Puntos. Fichero de texto plano que contiene una lista de identificadores, subconjunto de los identificadores de los puntos de control mencionados anteriormente.
- Resultado. Se crean dos ficheros con sufijos S2D y S3D, que contienen las coordenadas de los puntos en cada imagen y en el sistema de coordenadas euclideo local, respectivamente.

Ejemplo:

SaisieAppuisInit 'Imagen(1—2—3).jpg' orientacion-relativa Identificadores.txt MeasureInit.xml

GCPBascule Transforma las orientación relativa proporcionada por *Tapas* en el sistema de coordenadas euclideo, empleando las coordenadas 2D y 3D calculadas a través de *SaisieAppuisInit*.

Sintaxis y ejemplo:

GCPBascule ".JPG" orientacion-relativa rtl-init AppRTL.xml MeasureInit-S2D.xml*

- *.JPG, patrón que especifica las imágenes a procesar.
- orientacion-relativa, directorio que contiene la orientación de las imágenes.

- rtl-init, directorio en el que se almacenará la nueva orientación tras aplicar el cambio de sistema.
- AppRTL.xml, explicado en apartados anteriores.
- MeasureInit-S2D.xml, coordenadas bidimensionales que localiza los puntos de control en cada imagen.

SaisieAppuisPredic Muestra los puntos de control restantes del fichero AppRTL.xml no posicionados con *SaisieAppuisInit*, con los que se realiza un ajuste y validación manual. Sintaxis y ejemplo:

*SaisieAppuisPredic "imagen(1—2—3).*JPG" rtl-init AppRTL.xml MeasureFinale.xml*

- imagen[1—2—3].*JPG, patrón de imágenes sobre las que se van a posicionar puntos de control. Este comando deberá ejecutarse varias veces pasando como parámetro diferentes imágenes hasta situar todos los puntos de control en todas las imágenes en las que aparecen.
- rtl-init, directorio que contiene la orientación de las imágenes.
- AppRTL.xml, explicado en apartados anteriores.
- MeasureFinale.xml, donde se guarda el resultado. Se generarán dos ficheros con sufijos S2D y S3D, al igual que en los casos explicados anteriormente.

Posteriormente, se vuelve a utilizar el comando GCPBascule, que al contar esta vez con más puntos de control, la transformación del sistema de coordenadas será más precisa:

GCPBascule ".JPG" orientacion-relativa rtl-bascule AppRTL.xml MeasureFinale-S2D.xml*

Campari Lleva a cabo un ajuste utilizando de forma conjunta los puntos de control y los puntos correlativos calculados con sift++. Sintaxis y Ejemplo:

Campari ".JPG" rtl-bascule rtl-compense GCP=[AppRTL.xml,0.1,MeasureFinale-S2D.xml,0.5]*

- *.JPG, patrón que especifica imágenes sobre las que llevar a cabo el procesamiento.
- rtl-bascule, directorio que contiene la orientación de partida.

- rtl-compense, directorio en el que se almacenará la nueva orientación como resultado de la operación.
- 0.1, especifica el error de posicionamiento GPS en los puntos de control.
- 0.5, especifica el posible error cometido al posicionar manualmente los puntos de control en las imágenes.

ChgSysCo Se utiliza para convertir las coordenadas del sistema euclideo a coordenadas geográficas. Sintaxis y ejemplo:

*mm3d ChgSysCo “.*JPG” rtl-compense SysCoRTL.xml@Sys25830.xml OriGeografica*

- .*JPG es el patrón que especifica las imágenes a procesar.
- rtl-compense, orientación de las imágenes. En este caso, la orientación a utilizar es la generada por el anterior comando *Campari*.
- SysCoRTL.xml, explicado en comandos anteriores.
- Sys25830.xml, especifica el tipo de proyección a aplicar.
- OriGeografica, resultado de la operación.

Tarama Realiza un mosaico preeliminar. Sintaxis y ejemplo:

*Tarama “.*JPG” OriGeografica Out=ResultadoTarama*

- “.*JPG”, patrón que especifica las imágenes sobre las que se ejecuta el procesamiento.
- OriGeografica, Orientación de las imágenes.
- Out=ResultadoTarama, el resultado de la operación se guarda en *ResultadoTarama*

Malt Lleva a cabo una correlación densa entre las imágenes. Sintaxis y ejemplo:

*Malt Ortho “.*JPG” OriGeografica DirMEC=MEC-OriGeografica*

- Ortho, especifica que haga el procesamiento en modo Ortho, ya que el siguiente paso será la generación de la ortofoto.
- .*JPG, especifica el conjunto de imágenes sobre el que se lleva a cabo el procesamiento.

- DirMEC=MEC-OriGeografica, directorio en el que se guarda el resultado. También se crea un directorio Ortho-MEC-OriGeografica en el que se guardan ortoimágenes individuales, máscara a aplicar en cada imagen, etc, a utilizar posteriormente por el comando Tawny.

Tawny Utilidad para generar ortofotos. Es un interfaz a la utilidad *Porto*.
Sintaxis y ejemplo:

Tawny Ortho-MEC-OriGeografica

- Ortho-MEC-OriGeografica, directorio donde los datos han sido almacenados tras la ejecución de Malt. En este mismo directorio se genera el mosaico.

D.7.2. Flujo de trabajo

Una vez se han explicado todos los comandos, se muestra a continuación, a modo de esquema, una posible secuenciación de comandos. Los comandos SaisieAppuisInit y SaisieAppuisPredic deberán ejecutarse sucesivas veces utilizando cada vez imágenes diferentes. NamePointInit.txt, gcp.csv, SysCoRTL.xml, Sys25830.xml son ficheros que deben existir previamente.

```
Tapioca MulScale ".*JPG" 1000 2000
mm3d GCPConvert "#F=N_X_Y_Z" gcp.csv ChSys=DegreeWGS84@SysCoRTL.xml
Out=AppRTL.xml
SaisieAppuisInit "imagen[1—2].JPG" all NamePointInit.txt MeasureInit.xml
SzW=[800,700]
GCPBascule ".*JPG" all RTL-Init AppRTL.xml MeasureInit-S2D.xml
SaisieAppuisPredic "imagen[1—2].JPG" RTL-Init AppRTL.xml Measure-
Final.xml
GCPBascule ".*JPG" all RTL-Bascule AppRTL.xml MeasureFinal-S2D.xml
Campari ".*JPG" RTL-Bascule RTL-Compense GCP=[AppRTL.xml,0.1,MeasureFinal-
S2D.xml,0.5]
mm3d ChgSysCo ".*JPG" RTL-Compense SysCoRTL.xml@Sys25830.xml
epsg25830
Tarama *.JPG epsg25830 Out=TA-25830
Malt Ortho ".*JPG" epsg25830 DirMEC=MEC-epsg25830
Tawny Ortho-MEC-epsg25830/
```